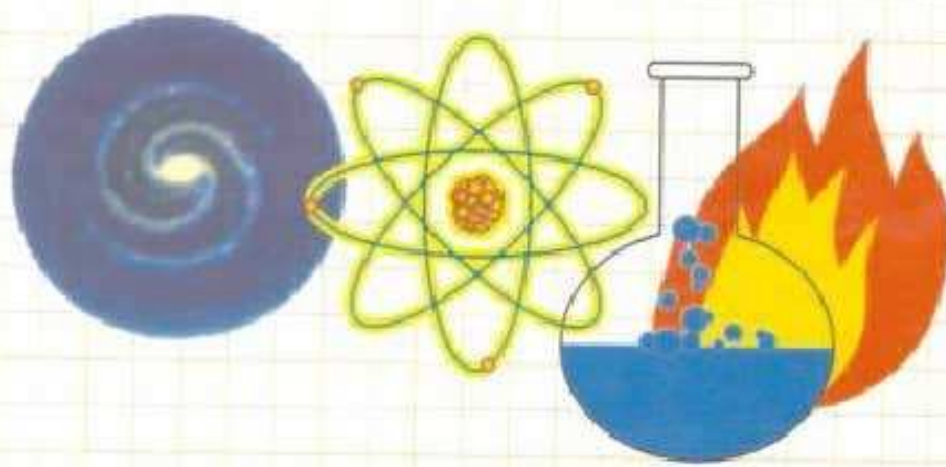


La ciencia en el aula

Lo que nos dice la ciencia
sobre cómo enseñarla

Gabriel Gellon
Elsa **Rosenvasser Feher**
Melina Furman
Diego **Golombek**



LA CIENCIA EN EL AULA

17.

18.

Biblioteca de CUESTIONES DE EDUCACIÓN

Dirigida por María Carmen Delgadillo

y Beatriz Alen

13. A. de Camilloni y otras - *Corrientes didácticas contemporáneas*
14. S. Alderoqui (comp.) - *Museos y escuelas*
15. C. A. Cullen - *Crítica de las razones de educar*
16. G. Diker y F. Terigi - *La formación de maestros y profesores: hoja de ruta*
19. S. Nicastro - *La historia institucional en la escuela*
20. I. Akoschky y otras - *Artes y escuela*
21. L. Fernández - *El análisis de lo institucional en la escuela. Notas teóricas*
22. L. Fernández - *El análisis de lo institucional en la escuela. Obra completa* (4 volúmenes)
23. E. Dabas - *Redes sociales, familias y escuela*
24. S. Calvo y otros (comps.) - *Retratos de familia ... en la escuela*
25. B. Fainholc - *La interactividad en la educación a distancia*
26. S. Duschatzky - *La escuela como frontera*
27. A. Padovani - *Contar cuentos*
28. M. Krichesky y otros - *Proyectos de orientación y tutoría*
29. A. Malajovich (comp.) - *Recorridos didácticos en la educación inicial*
30. M. I. Bringiotti - *La escuela ante los niños maltratados*
31. M. Libedinsky - *La innovación didáctica*
32. R. Morduchowicz - *A mí la tele me enseña muchas cosas*
33. M. Carozzi de Rojo - *Proyectos integrados en la EGB*
34. P. Pineau, I. Dussel y M. Caruso - *La escuela como máquina de educar*
35. J. Imberti (comp.) - *Violencia y escuela*
36. S. Alderoqui y P. Penchansky (comps.) - *Ciudad y ciudadanos*
37. R. Damin y A. Monteleone - *Temas ambientales en el aula*
38. S. Nicastro y M. Andreozzi - *El asesoramiento pedagógico en acción*
39. M. De Cristóforis (comp.) - *Historias de inicios y desafíos*
40. M. Panizza (comp.) - *Enseñar matemática en el Nivel Inicial y el primer ciclo de la EGB*
42. H. Hochstaet - *Aprendiendo de los chicos en el jardín de infantes*
43. L. Lacreu (comp.) - *El agua. Saberes escolares y perspectiva científica*
44. C. A. Cullen - *Perfiles ético-políticos de la educación*
45. P. Redondo - *Escuelas y pobreza: entre el desasosiego y la obstinación*
46. C. Soto y R. VioJante (comps.) - *En el jardín maternal*
47. P. Pineau (comp.) - *Relatos de escuela*
48. G. Gellon, E. Rosenvasser Feher y otros - *La ciencia en el aula*

Si desea recibir información mensual de nuestras novedades/publicaciones, y ser incorporado a nuestra lista de correo electrónico, por favor envíenos los siguientes datos a difusion@editorialpaidos.com.ar

Nombre y apellido, profesión y dirección de e-mail.

23.

LA CIENCIA EN EL AULA

Lo que nos dice la ciencia sobre cómo enseñarla

Gabriel Gellon Elsa Rosenvasser Feher Melina Furman Diego
Golombek



Paidós

Buenos Aires > Barcelona > México

24.

370.1 CDD

Gellon, Gabriel

La ciencia en el aula: lo que nos dice la ciencia sobre cómo enseñarla/Gabriel Gellon; Elsa Rosenvasser Feher; Melina Furman, Diego Golombek.- I" ed.- Buenos Aires: Paidós, 2005.

264 p. ; 22x16 cm.- (Cuestiones de educación)

ISBN 950-12-6148-4

1. Filosofía de la Educación 1. Rosenvasser Feher, Elsa II. Diego Golombek III. Título
Cubierta de Gustavo Macri

la *edición*, 2005

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del *copyright*, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

© 2005 de todas las ediciones Editorial Paidós SAICF Defensa 599, Buenos Aires

e-mail: literaria@editorialpaidos.com.ar www.paidosargentina.com.ar

Queda hecho el depósito que previene la Ley 11.723 Impreso en la Argentina - Printed in Argentina
Impreso en Primera Clase

California 1231, Ciudad de Buenos Aires, en julio de 2005 Tirada: 2500 ejemplares

ISBN 950-12-6148-4

Índice

Acerca de los autores.....13

Introducción..... 15

 Una educación centrada en el proceso de construcción
 de las ideas científicas 16

La ciencia y el aula.....19

Estructura del libro 23

PRIMERA PARTE

EL ASPECTO EMPÍRICO DE LA CIENCIA

1.....El mundo de los fenómenos... 27

 El aspecto empírico de la ciencia.....28

 Contacto directo con los fenómenos 29

 Uso y abuso de las palabras 31

 Definiciones operacionales y definiciones de corte teórico.... 33

 Evolución de la terminología científica 34

 Las experiencias de laboratorio... 35

 Construyendo ideas "desde cero" 36

 La dinámica de la indagación en el aula.....37

¿Cómo respetar el aspecto empírico de la ciencia en el caso de
fenómenos que no se pueden observar en el aula? 37

Prácticas pedagógicas sugeridas para destacar el aspecto empírico
de la ciencia 39

2.....Reacciones químicas: una exploración lúdica
..... 41

 ¿Cómo definir una reacción? 41

 Disoluciones y reacciones químicas 43

 Actividad 1: ¿Cuál es la mezcla? 43

 Actividad 2: ¿Qué va a pasar cuando mezcle estos líquidos? 46

 Conclusión " " " 48

3.....Carga electrostática: una secuencia de actividades guiadas
.....49

 Breve historia del concepto de "carga" 50

 Inicios 51

 Dos tipos de electricidad 51

 ¿Dos fluidos o uno solo? 52

 Concepciones previas de los estudiantes 53

 Actividad 1: Observaciones básicas 54

 Comentario de la Actividad 1 55

 Actividad 2: Dos tipos de carga 57

 Comentario de la Actividad 2 59

 Actividad 3: Síntesis grupal 60

 Comentario de la Actividad 3 61

 Actividad 4: Repaso de lo aprendido 63

 Comentario de la Actividad 4 63

 Reflexiones finales 61

SEGUNDA PARTE

EL ASPECTO METODOLÓGICO DE LA CIENCIA

4.....Gajes del oficio 69

 El aspecto metodológico de la ciencia en el aula 73

 Las preguntas 74

 Las hipótesis 75

 Las observaciones 77

 Los experimentos.....78

INTRODUCCIÓN

Este libro está dirigido a docentes de ciencia, específicamente a profesores de física, química y biología de nivel medio, pero también a aquellos educadores, directivos y científicos interesados en la educación en ciencias. Las propuestas de esta obra provienen de la experiencia de los autores en su trabajo como científicos de diversas disciplinas (física, genética, neurobiología) y como educadores de variados niveles y estilos (secundario, universitario, en museos, al aire libre).

El propósito de este libro es discutir formas de mejorar la enseñanza de las ciencias en el nivel medio. Esto supone que la enseñanza actual, o al menos la tradicional, no cumple efectivamente con su objetivo educativo. ¿Cuál es este objetivo y qué evidencias tenemos de que la educación tradicional no logra alcanzarlo? ¿Cuáles son las propuestas recientes para resolver este problema? ¿Cómo se encuadran las propuestas del presente libro dentro de las visiones modernas de la educación en las ciencias? Éstas son las preguntas que intentaremos explorar en la presente introducción.

La tesis central de este trabajo es que las ideas que produce la ciencia están indisolublemente ligadas con la forma en que son producidas. Sostenemos que esta conexión es tan profunda que resulta imposible (o especialmente arduo) establecer una comprensión profunda de los conceptos científicos fundamentales sin un entendimiento más o menos cabal de cómo se arriba a esos conceptos a través de la investigación.

Las ideas producidas por la ciencia tienen sentido para los científicos porque éstos entienden cómo se ha manejado la evidencia, hasta qué punto las aseveraciones parten de observaciones o de modelos teóricos, qué tipo de críticas y restricciones se han hecho a determinada línea argumental, qué significa el apoyo de la comunidad científica o el valor de una publicación, e incluso en qué contexto histórico o político se ha generado una idea. Es decir, los científicos están embebidos en el proceso de la creación científica. Por el contrario, la educación tradicional en el aula ignora casi por completo el proceso de generación de las ideas, enfocando su atención casi exclusivamente en el producto final de la ciencia. Esto hace que los alumnos lleguen a comprensiones superficiales y frágiles, cuando no francamente erróneas, de las ideas científicas. Es posible y, a nuestro criterio, imperativo generar una educación en las ciencias cuyo foco sea el proceso de construcción de las ideas, a fin de que los estudiantes comprendan a fondo el significado del conocimiento científico.

Debemos aclarar que, en este libro, cuando decimos "ciencia" nos referimos a las ciencias naturales, que incluyen disciplinas como la física, química, biología, geología, meteorología y astronomía. No consideramos entre ellas a disciplinas que no estudian fenómenos de la naturaleza, como la matemática y las ciencias sociales. Por ende, cada vez que usemos las palabras "ciencia" o "ciencias" deberá entenderse que nos referimos a las ciencias naturales, a menos que se aclare lo contrario.

UNA EDUCACIÓN CENTRADA EN EL PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DE LAS IDEAS CIENTÍFICAS

Tradicionalmente, la educación ha consistido en la transmisión de un cuerpo de conocimientos, suponiendo que el profesor es el custodio del saber y los alumnos son *tabulas rasas* que, como un disco a grabar o un cesto vacío, deben llenarse de contenido. La educación en ciencias en el nivel medio ha girado tradicionalmente en torno a un programa de contenidos "canónicos" impartidos en clases teóricas magistrales, clases de laboratorio (en las que el alumno se familiariza con aparatos, drogas y procedimientos y comprueba las ideas formuladas en la clase teórica) y clases de resolución de problemas (para practicar los razonamientos y aplicaciones del tema). Aunque como concepción pedagógica este enfoque actualmente se considere anticuado, en la práctica se sigue usando. Posiblemente, por-

que no les resulte claro a muchos docentes cómo encarar la enseñanza de otra forma. De esto, en parte, trata este libro.

El enfoque actual de la enseñanza sostiene que los alumnos, lejos de ser recipientes vacíos, llegan al aula con ideas que son fruto de sus experiencias previas. Sobre la base de estas ideas y de sus interacciones con la realidad física y social del aula, los alumnos construyen nuevos conocimientos. Desde esta perspectiva, una de las tareas del docente debería ser ayudar al alumno a tomar conciencia de sus propias ideas preexistentes, dándole oportunidad para confrontarlas, debatirlas, afianzarlas o usarlas como andamiaje para llegar a ideas más sofisticadas. En suma, el alumno elabora o construye en forma activa su conocimiento y deja de ser un recipiente pasivo a la espera de material que le llega de afuera. Y el docente debe convertirse en facilitador y guía de este aprendizaje activo de sus alumnos.

Esta visión actual de la enseñanza cobra fuerza a partir de la década del setenta. En esos años aparecen, en forma independiente pero paralela, tres movimientos que buscan formas novedosas de entender cómo los alumnos construyen su propio entendimiento, y de poner en práctica los resultados. Revisemos brevemente estos movimientos. Por un lado, las sociedades científicas abrieron nuevas secciones en sus congresos, especialmente dedicadas a la presentación de trabajos de investigación sobre las dificultades de los alumnos para aprender conceptos científicos. Estas investigaciones diferían fundamentalmente de los trabajos educativos tradicionales que se centraban en análisis estadísticos del desempeño de los alumnos en pruebas y exámenes. Los nuevos trabajos, más bien, eran estudios cualitativos, que buscaban precisamente el detalle que se esfuma en los tratamientos estadísticos. Las metodologías se importaban de las ciencias sociales: algunos eran estudios de casos discretos; otros usaban entrevistas abiertas al estilo de Piaget; otros comparaban las estrategias de novicios y de expertos para resolver problemas. Los investigadores no eran ya educadores interesados en la enseñanza de la ciencia sino científicos interesados en cuestiones de aprendizaje.

En esta época también nace la "ciencia de la cognición", un campo interdisciplinario en la intersección de la biología, la inteligencia artificial, la psicología y la filosofía (Gardner, 1996). Esta ciencia busca entender cómo los seres humanos pensamos, resolvemos problemas, formamos conceptos. El surgimiento de la ciencia cognitiva representó una verdadera revolución ya que, previamente, los conductistas (también llamados behavioristas) sostenían que sólo era posible estudiar las respuestas a estímulos de un organismo que aprende y, desde esa perspectiva, la mente del estudiante o

Introducción

diantes de ciencia en un aula aprecien cómo surge y se valida una idea teórica, y cómo cambia con el tiempo por una combinación de evolución interna, fuerzas sociales y evidencia empírica. Estas ideas abstractas que se inventan para explicar la evidencia empírica constituyen lo que llamamos el *aspecto abstracto de la ciencia*. Si un estudiante no logra distinguir claramente entre una idea derivada de la observación directa y otra inventada para acomodar observaciones, no sólo no podrá entender de manera caballa dinámica interna del proceso científico, sino que tendrá una visión frágil y caricaturizada de conceptos científicos importantes.

Así como las teorías moldean nuestras observaciones, también las fuerzas sociales dentro y fuera de la comunidad científica determinan lo que conocernos y cómo lo conocernos. Tanto la formulación de ideas por parte de los científicos como la construcción de conocimiento por parte de los estudiantes son procesos sociales en los que los participantes interactúan unos con otros para poner a prueba sus ideas y verificar si encajan con las de los demás. Actualmente se reconoce que el aspecto social del aula es un instrumento importante para una educación eficaz, un instrumento que está ausente de las clases en que el profesor expone los contenidos y los estudiantes toman nota y resuelven problemas sin interactuar entre sí. El *aspecto social de la ciencia* difiere de su contraparte en el aula, y es necesario resaltar esa diferencia para poder hacer al aula más científica. Mientras que en el aula puede existir un árbitro con autoridad, como puede ser el docente o el libro de texto, la actividad científica construye sus conocimientos mediante el consenso informado de una gran multitud de participantes, ninguno de los cuales es depositario *a priori* de la verdad. El proceso de crítica y mutua corrección por pares es característico de la ciencia y aparece en los sistemas de referato para la publicación de artículos en revistas profesionales y para la evaluación de proyectos de investigación. Las ideas o explicaciones a las que la ciencia arriba no resultan "ciertas" mediante criterios objetivos, infalibles y externos al grupo que debate sobre ellas; más bien se aceptan cuando la vasta mayoría de los participantes está convencida más allá de toda duda razonable.

A veces los estudiantes (o el público lego en general) miran con aprehensión este aspecto de la ciencia, como si negara todos los demás. Si todo depende de consensos y no hay criterios "objetivos", definitivos, ¿entonces la ciencia es un mero juego subjetivo en el que cualquier respuesta es válida? Para comprender que no es así, los estudiantes deben de alguna manera participar de la generación de conocimiento en grupo, a través de discusiones e intentos de persuasión en los cuales la evidencia empírica y

la lógica interna cumplen un papel central. Este tipo de experiencia lleva a los alumnos a entender que muchas veces los contextos culturales e históricos afectan a, y son afectados por, las ideas científicas en boga, y que tabúes culturales o personalidades intimidantes pueden determinar qué problemas se investigan y qué descubrimientos son viables.

Todo esto parece sugerir que la base de una eficaz y rica educación científica consiste en reproducir en el aula las condiciones de producción de conocimiento que encontramos en el laboratorio o equipo de investigación, es decir, permitir que los estudiantes se sumerjan en el libre juego de hacer ciencia como los científicos. Una posibilidad sería exponer a los estudiantes a un problema o serie de problemas reales, o a una colección de fenómenos desafiantes, y dejar que ellos mismos generen las ideas y descubran las leyes científicas. Este método de "jugar con las cosas y ver qué es lo que sucede" ¹ puede ser estupendo en la escuela primaria. Pero no se puede pretender que niños o adolescentes descubran por sí mismos las ideas sutiles y poderosas de la ciencia.

Ocurre que muchas de las ideas importantes del conocimiento científico son profundamente contraintuitivas, y no se llega a ellas mediante las formas naturales de pensamiento del común de la gente. En otras palabras, podemos apostar que librados a su propio "descubrimiento" los estudiantes no siempre llegarán a las ideas y comprensiones buscadas por el docente. La ciencia es frecuentemente un desafío al sentido común. No sólo las ideas científicas suelen ser difíciles, sino que la forma misma de pensar que caracteriza a la investigación científica debe ser enseñada y aprendida. A este aspecto crítico del pensamiento científico lo denominamos el *aspecto contraintuitivo de la ciencia*. Lo trataremos en detalle en el capítulo 3, y en los capítulos 4 y 5 daremos ejemplos de las formas en que el pensamiento cotidiano, basado en el sentido común, dificulta el acceso a ciertas ideas científicas, y de cómo se puede allanar el camino a los alumnos.

En definitiva, la misma investigación que muestra lo inadecuado de la educación tradicional nos alerta sobre esquemas basados en la exploración sin guía por parte de los estudiantes. Es importante que los estudiantes formulen sus propias hipótesis y aprendan de otros más avezados cómo comprobarlas o refutarlas. Es importante que aprendan a realizar observaciones y extraer conclusiones de ellas, a hacer simplificaciones y generar modelos, a identificar los supuestos implícitos y tantos otros trucos del pensa-

1. Llamado *discovery learning* en la literatura en inglés.

Introducción

miento científico. Una clase teórica clásica no puede brindar todas estas herramientas, pero tampoco pueden surgir del mero juego. El docente debe crear las condiciones que resulten una guía eficaz para la indagación y el desarrollo de las ideas científicas por parte de los alumnos.

ESTRUCTURA DEL LIBRO

Este libro consta de cinco partes, cada una de las cuales examina uno de los aspectos de la ciencia que hemos descripto en esta introducción. Cada parte comienza con un capítulo en el que se discute el aspecto en cuestión, mostrando cómo se expresa en el quehacer científico, cómo se puede llevar al aula y qué prácticas pedagógicas se pueden usar para incorporar este aspecto a la tarea educativa. Cada uno de estos capítulos expositivos va acompañado de dos capítulos ilustrativos en los cuales se dan ejemplos concretos de actividades educativas que incluyen las prácticas pedagógicas sugeridas.

Ofrecernos ejemplos que ilustran una variedad de formatos, desde prácticas de laboratorio y clases altamente centradas en el docente, hasta guías de indagación mediante las cuales los estudiantes pueden construir su propio conocimiento, incluyendo también teatralizaciones y discusiones abiertas. En cuanto al contenido, hemos incluido ejemplos de varias disciplinas, como química, biología, física y astronomía, entre otras.

Creemos que los ejemplos sugeridos exploran una cantidad suficiente de temas y formatos como para dejar al lector con la idea de que nuestro enfoque puede usarse en una gran variedad de circunstancias, y que no es sólo posible sino deseable que los docentes experimenten con sus propias actividades. Como en la investigación científica, la innovación en el aula depende enormemente de la creatividad individual y también, creemos, de la crítica mutua y la exploración conjunta. Al igual que en la investigación científica, para llegar a buen puerto en la enseñanza no existe un método único o una receta infalible. Pero cuanto más involucrados estemos en el proceso de desarrollo de las ideas, más maravilloso será el resultado.

mediante reacciones químicas en otros sistemas con propiedades distintas". En otras palabras, si nos dan un frasco con un líquido desconocido y nos preguntan si se trata de un elemento, sólo tendremos que tratar de descomponerlo químicamente: si lo logramos, el líquido no es un elemento; si no lo logramos, el líquido es un elemento.

Los diferentes tipos de definiciones promueven distintos aspectos de conocimiento científico si son introducidos en el orden adecuado. La definición operacional, por su naturaleza, evoca nuestra experiencia sensorial) el espacio donde se realizan las operaciones (laboratorio, campo, etc.), y de esa manera nos fuerza a un punto de vista empírico. Las definiciones teóricas, en cambio, surgen como fruto de los cuerpos de teoría, los cuales por lo general son elaborados a fin de dar sentido a una vasta gama de observaciones o fenómenos primarios. Es decir que el orden natural en la construcción de las ideas científicas por parte de los investigadores va desde observaciones crudas a edificios cada vez más complejos de teorías que buscan aunar dichas observaciones. La introducción demasiado temprana de definiciones de corte teórico viola esta secuencia propia de la ciencia y redundante en la mistificación de los términos usados. Introducir términos basados en edificios teóricos que aún no han sido levantados por los estudiantes es forzarlos a aceptar un conjunto de ideas sin basamento racional, como conocimiento revelado en vez de construido. Las definiciones operacionales, por el contrario, refuerzan la idea de que los términos son usados para describir cosas concretas del mundo real. Ahondaremos en el tema de las construcciones teóricas al discutir los aspectos abstractos de la ciencia en la tercera parte de este libro.

EVOLUCIÓN DE LA TERMINOLOGÍA CIENTÍFICA

La terminología científica es dinámica: los términos se definen y redefinen a lo largo de la historia a medida que los científicos aprenden más sobre los fenómenos que estudian. Será interesante exponer a los estudiantes a esta vivencia de que los términos científicos evolucionan junto con nuestra comprensión de la realidad. Por ejemplo, una clase de dinámica

4. Esta definición asume que tenemos también definiciones operacionales de los términos "reacción química" y "descomposición", pero ambas definiciones son posibles sin utilizar el término "elemento".

El mundo de los fenómenos

puede comenzar usando una definición simple del concepto de fuerza, basada en la sensación física de nuestros músculos. Luego puede introducirse una definición dentro del marco aristotélico de pensamiento, como "aquello que mueve las cosas" o "sin fuerzas no se puede sostener el movimiento". Ésta puede evolucionar a tiempos galileanos aceptando el principio de inercia: "una fuerza es aquello que inicia o detiene el movimiento pero no es necesaria para mantenerlo". Así, a través de refinamientos puede llegarse a una definición que introduzca las leyes segunda y tercera de Newton y haga referencia a la aceleración. Normalmente los cursos de la escuela secundaria

se detienen en esta definición como la correcta, pero un estudiante acostumbrado a percibir que las definiciones van cambiando a medida que refinamos nuestras ideas no se sorprenderá si en el futuro es necesario cambiarla una vez más para introducir más refinamientos teóricos (por ejemplo, "fuerza es aquello que cambia la cantidad de movimiento de un objeto, considerando a la masa como función de la velocidad").

Mostrar que los términos evolucionan en su significado es otra manera de bajar a las palabras de su pedestal de autoridad y convertirlas de a poco en nada más ni nada menos que herramientas de pensamiento y comunicación. Nuestros alumnos deberán apreciar que las palabras están al servicio de nuestro pensamiento y no al revés.

LAS EXPERIENCIAS DE LABORATORIO

Hemos dicho que la secuencia que usamos para desarrollar una idea puede tener impacto en cuán ajustada estará la clase a los aspectos empíricos de la ciencia. Esto es especialmente cierto en el caso de las prácticas de laboratorio. Una práctica de laboratorio en la cual solamente se verifica lo que se estudió previamente en la clase teórica no promueve un pensamiento empírico. Por el contrario, sugiere que la verdad está en los libros o en la cabeza del profesor y que los experimentos son simplemente maneras de comprobar una de esas verdades, no una forma de descubrirlas. Una buena práctica en el aula es la de desarrollar ideas a partir de experiencias o prácticas de laboratorio y no al revés; en otras palabras, no utilizar las prácticas de laboratorio para demostrar o confirmar ideas desarrolladas en el pizarrón. Esta forma de proceder tiene la virtud de desterrar del aula la frase: "el experimento me dio mal". ¿Cómo puede "dar mal" un experimento? Solamente si se sabe de antemano cuál "debería"

ser la respuesta. Y aun así: si el experimento no dio el resultado esperado, se necesita hacer comprender al alumno que se obtuvo lo que tenía que dar *en las condiciones imperantes*. Quizá había un circuito mal armado, es decir, armado en forma distinta de la deseada- o tal vez la sustancia química usada no era pura como se creía sino que estaba contaminada. Buscar la fuente de la discrepancia entre el resultado real y el esperado es parte del hacer buena ciencia.

CONSTRUYENDO IDEAS "DESDE CERO"

Si quisiéramos respetar el aspecto empírico al máximo posible, deberíamos desarrollar actividades en las que las ideas se construyan "desde cero". En un programa de este tipo, los estudiantes empiezan usando sólo sus sentidos y su experiencia cotidiana, dejando conscientemente de lado conceptos y términos científicos escuchados o aprendidos previamente. Por ejemplo, una investigación sobre el movimiento de la Tierra y el Sol puede introducirse así: "Intentemos olvidarnos de lo que conocemos sobre cómo se mueven la Tierra y el Sol, y vamos a tratar de explicarlo a partir de lo que nos dicen nuestros sentidos, como si fuéramos antiguos exploradores del cielo". A partir de allí se desarrollan investigaciones o discusiones que van construyendo un tejido de conceptos: se suceden las observaciones, hipótesis y construcción de modelos hasta desarrollar las ideas buscadas. En este esquema no existe un texto "verdadero" y la información que brinda el docente es muy limitada.

En este tipo de trabajo los estudiantes avanzan por un proceso de descubrimiento guiado, altamente digitado por el diseño del programa de enseñanza. En este abordaje, igual que en la investigación científica real, los conceptos se construyen sólo por lo que la experiencia requiere o permite: no se usan fórmulas del estilo "esto ha sido probado por otros científicos" o "esto es así porque lo digo yo".

Existe un interesante programa de este tipo de abordaje "desde cero" que desarrolla todos los conceptos fundamentales de circuitos eléctricos (Steinberg *et al.*, 2004). Pero debe reconocerse que la creación de un programa de este tipo conlleva un trabajo formidable y supone múltiples evaluaciones con estudiantes.

LA DINÁMICA DE LA INDAGACIÓN EN EL AULA

Son numerosos los aspectos del trabajo en el aula que promueven la verdad revelada y hacen difícil un acercamiento empírico a la ciencia. Algunos son verdaderamente sutiles. Por ejemplo, el manejo de los tiempos puede tener un impacto considerable en la construcción de ideas de los alumnos. Pensar requiere tiempo, sobre todo en relación con la elaboración de explicaciones y de predicciones a la que nos referíamos más arriba. Y este tiempo no es uniforme: algunos alumnos requieren más tiempo que otros. Al trabajar con diálogos y preguntas orales es importante tener en cuenta la labor de la investigadora y docente estadounidense Mary Budd Rowe (1978), quien sostuvo, sobre la base de múltiples estudios, que luego de hacer una pregunta es necesario que el docente espere por lo menos tres segundos antes de volver a hablar y otros tres segundos después de la respuesta del alumno. Estos tiempos de espera mejoran mucho la calidad de los diálogos durante el proceso de indagación ya que le permiten al alumno interpelado elaborar su respuesta y, después de formularla, ampliarla y agregar comentarios. Sin embargo, las investigaciones muestran que muy pocos docentes cumplen con estos tiempos de espera y que, cuando los ponen en práctica, acostumbrados a esperas de menos de un segundo, esos tres segundos les resultan increíblemente largos.

¿Qué pasa con las brevísimas pausas que se les suelen dar a los alumnos para elaborar contestaciones? Sucede que, al no tener tiempo para pensar en una respuesta adecuada, la pregunta del docente se vuelve retórica y es seguida por la respuesta dada por el mismo docente. Así es como, al no dar lugar al proceso de construcción por parte del alumno, las ideas toman el carácter de verdades reveladas. Esto muestra hasta qué punto la dinámica de la relación entre alumno y docente desempeña un papel importante en el aprendizaje.

¿CÓMO RESPETAR EL ASPECTO EMPÍRICO DE LA CIENCIA EN EL CASO DE FENÓMENOS QUE NO SE PUEDEN OBSERVAR EN EL AULA?

No siempre es posible exponer a los alumnos a los fenómenos naturales, especialmente cuando tratamos los aspectos más modernos de la ciencia. Los fenómenos que buscan entender los científicos no son sólo aquellos que vemos con nuestros ojos, tocamos con nuestras manos u oímos con nuestros oídos sino también todo aquello que detectamos mediante instrumentos-

que extienden nuestros sentidos (por ejemplo, telescopios para detectar lo que está muy lejano, microscopios para detectar lo que es muy pequeño, termómetros para detectar temperaturas muy altas o muy bajas). La ciencia actual describe la naturaleza de galaxias lejanas, el inicio del Universo, temperaturas impensables, velocidades inauditas, cosas que pasan dentro de nuestras células y que no podemos ver, y fuerzas que somos incapaces de experimentar con nuestro cuerpo. Sabemos ahora que la luz tiene colores (como el ultravioleta) que no somos capaces de distinguir con nuestros sentidos, porque nuestras investigaciones, teorías e instrumentos nos dicen que así es. El docente de ciencias debe ser extremadamente ducho (y al mismo tiempo cauto) para proveer la evidencia suficiente a fin de convencer al estudiante de que esas "cosas invisibles" existen.

¿Cómo respetar el aspecto empírico de la ciencia en el caso de fenómenos que no podemos observar en el aula? El hecho de que no podamos observarlos no significa que no podamos describirlos. En todos estos casos, deberemos siempre hacernos estas sencillas preguntas: "¿Cómo sabemos que esto es así?" y "¿Cuál es la evidencia que sostiene esta o aquella afirmación?". A veces las evidencias empíricas de las ideas que afirmamos son fáciles de evocar o de imaginar, pero otras no. Por ejemplo, explicamos los fenómenos que vemos en circuitos eléctricos diciendo que se deben a un flujo de electrones dentro del cable. ¿Cómo sabemos que son electrones los que fluyen dentro del cable (o, para el caso, cómo sabemos que hay "algo" que fluye)? Una excelente práctica para todo docente de ciencias es tratar de indagar cuáles son las evidencias empíricas de cada concepto que se quiere enseñar. Esto muchas veces nos llevará a analizar en detalle los hechos históricos que condujeron a esas ideas.

La historia de la ciencia brinda ejemplos riquísimos acerca de cómo las ideas científicas se construyen a partir de la observación y exploración de fenómenos. Estos ejemplos históricos le dan vida al tema y muestran el drama y la pasión del descubrimiento. Por supuesto, no basta con decir que Boyle vivió en tal época y descubrió esto y aquello sobre los gases. Tendremos que ver cuáles eran las preguntas que se hacía, por qué eran relevantes, qué sabía y qué no podía saber, qué decían sus contemporáneos, qué mostraron sus experimentos, qué cosas sus experimentos no mostraron pero eran en principio posibles. Esto ayudará a mostrar que los científicos no consiguen las respuestas simplemente pensando: de alguna manera deben obtenerlas de la realidad.

En suma, para poder aprender a pensar científicamente los estudiantes deben comprender cómo los investigadores formulan ideas para explicar la

realidad que percibimos. No basta con decirles a los estudiantes que la ciencia es empírica; es necesario modelar ese "empiricismo" en cada paso que demos en el aula. Al mismo tiempo, deberemos estar alertas acerca de qué tipo de conductas del docente contradicen el espíritu empírico de la labor científica. Hemos identificado algunas de esas actitudes y hemos propuesto, a lo largo de este capítulo, formas de crear actividades y ambientes en el aula que promuevan tal espíritu.

Para finalizar, resumiremos en el siguiente apartado estas sugerencias, a las cuales cada docente podrá agregar las propias. En los capítulos 2 y 3 discutiremos en detalle dos ejemplos concretos de cómo introducir el aspecto empírico en el aula de ciencias. El capítulo 2 gira en torno del mundo de los fenómenos en la clase de química. En el capítulo 3 se brinda una guía de preguntas para enmarcar actividades destinadas a construir el concepto de carga eléctrica.

PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS SUGERIDAS PARA DESTACAR EL ASPECTO EMPÍRICO DE LA CIENCIA

- Brindar la oportunidad a los estudiantes de observar fenómenos y de formar sus propias ideas sobre ellos.
- Usar la secuencia "fenómeno-idea-terminología" al explorar un tema.
- Utilizar preferentemente definiciones operacionales en lugar de definiciones de corte teórico.
- Modificar o refinar conceptos y definiciones de términos sobre la base de nuevas observaciones o ideas.
- Desarrollar ideas a partir de experiencias o prácticas de laboratorio.
- Usar actividades de exploración guiadas que arranquen "desde cero", es decir, fomentando que los estudiantes construyan sus ideas de acuerdo con lo que perciben.
- Prestar atención a la dinámica del aula; por ejemplo, brindando suficiente tiempo a los alumnos para que piensen y elaboren sus respuestas a las preguntas del docente.
- Poner especial atención en indagar la evidencia empírica que lleva a formular conceptos cuando se trata de fenómenos no observables en el aula.
- Considerar casos históricos, analizando la secuencia de desarrollo de una idea a partir de las observaciones y experimentos e incluyendo la definición y redefinición de términos.

REACCIONES QUÍMICAS: UNA EXPLORACIÓN LÚDICA

En el capítulo anterior hemos discutido una serie de posibles actitudes y actividades que, a nuestro entender, promueven una enseñanza que enfatiza el aspecto empírico de la ciencia. Elaboraremos aquí un ejemplo concreto en el que se brinda la oportunidad a los estudiantes de observar fenómenos y de formar sus propias ideas sobre qué significan o por qué suceden. Veremos el modo en que esta exploración conduce al desarrollo y a la comprensión de conceptos.

El ejemplo que presentamos en este capítulo consiste en experiencias y observaciones que los alumnos efectúan en forma relativamente libre y lúdica, y a partir de los cuales se desarrolla la idea de "reacción química". En las exploraciones y discusiones se comenzará usando la secuencia fenómeno-idea-terminología (propuesta en el capítulo 1) para caracterizar una mezcla de sustancias. Luego, sobre la base de nuevos experimentos y observaciones, se modificará y refinará la idea de "mezcla" para llegar a definir, en forma operacional, una reacción química.

¿CÓMO DEFINIR UNA REACCIÓN?

En la enseñanza de la química es de primera importancia definir y caracterizar una reacción química. Sin embargo, esto no es una tarea fácil.

Si optamos por decir que una reacción química es un proceso en el cual las sustancias constituyentes cambian y se transforman en otras sustancias, tendremos el problema posterior de definir qué entendemos por "sustancia". A su vez, la definición de sustancia por lo general invoca la idea de reacción química y se entra así en un pensamiento circular. Una buena definición (operacional) podría lograrse si consideramos que en una reacción química las propiedades del sistema varían significativamente. Supongamos, como ejemplo de trabajo, que mezclamos dos líquidos. Podemos decir que ocurre una reacción química si las propiedades del sistema resultante no son predecibles a partir de las propiedades de los dos líquidos originales (por ejemplo, si vemos aparecer un gas u ocurre un cambio de color). Normalmente adscribimos propiedades particulares a ciertas sustancias, es decir, llamamos sustancia tal o cual a un sistema que tiene ciertas propiedades características. Justamente cuando en un fenómeno las propiedades varían dramática e inusitadamente llegamos a la conclusión de que las sustancias en el sistema deben de estar cambiando. Nadie ve a las sustancias cambiar, sino que detectamos cambios en las propiedades del sistema.

En el primer acercamiento a la química, entonces, es esencial exponer a los estudiantes a las propiedades de diferentes sustancias: metales, sales, agua, alcohol y otros solventes y, si es posible, gases como el oxígeno y el dióxido de carbono. También es importante exponerlos a los diferentes tipos de interacciones que ocurren cuando dos sustancias (o sistemas) se ponen en contacto. Sin este conocimiento directo, experiencial, las discusiones posteriores, más abstractas, acerca de qué es o no es una sustancia o una disolución o una reacción química, resultan incomprensibles.

Más adelante describiremos una actividad basada en un juego de competencia con mezclas de alcohol y agua, y una actividad exploratoria de laboratorio a fin de distinguir entre disoluciones y reacciones químicas en estado líquido. Mediante estos juegos y exploraciones los estudiantes toman contacto con los fenómenos primarios sobre los que se basan los conceptos químicos fundamentales. En vez de hablar primero de estos conceptos bastante difíciles, se presentan los fenómenos sin mucha explicación; la experiencia ganada es la plataforma de lanzamiento para discusiones posteriores.

DISOLUCIONES Y REACCIONES QUÍMICAS

Desde el punto de vista de los contenidos curriculares, las actividades aquí propuestas preparan el terreno para discutir rigurosamente qué tipo de interacciones pueden sufrir dos sistemas materiales al ser puestos en contacto.

En un caso, la interacción no produce efectos: los sistemas permanecen intactos y, aunque puede resultar aburrido, es esencial subrayar la posibilidad de este resultado "trivial". Un ejemplo es poner una bolita de vidrio en un vaso con agua: nada le pasa a la bolita o al agua. En un segundo caso los dos sistemas se mezclan íntimamente y se produce lo que llamamos una solución. En este proceso las propiedades de la mezcla se asemejan a las propiedades de los sistemas originales y dependen de la cantidad relativa de cada uno de los componentes. Por ejemplo, en el caso de una solución de sal en agua, si ponernos más sal en el agua, la solución será más salada; si ponemos más agua, será más acuosa. Una tercera posibilidad es que suceda algo inusitado: mezclamos dos líquidos rojos y el resultado es verde; juntamos dos líquidos incoloros y el resultado es un sólido amarillo. Las propiedades nuevas, aducimos, son el resultado de la presencia de nuevas sustancias que no estaban presentes en los sistemas originales y que aparecen a partir de la interacción de estos sistemas. Esto es lo que llamamos reacción química.

Sugerirnos a continuación una forma de poner en contacto a los estudiantes con estas dos últimas interacciones: la disolución y la reacción. Pero es importante notar que este juego propuesto debe realizarse antes de introducir los conceptos discutidos. El juego es precisamente esa introducción.

ACTIVIDAD 1: ¿CUÁL ES LA MEZCLA?

Para esta actividad se les pedirá a los alumnos que formen grupos de dos o tres integrantes, y que cada grupo obtenga tres soluciones diferentes de alcohol y agua. Una de ellas contendrá 25% del volumen de alcohol y 75% del volumen de agua. Otra tendrá la composición opuesta: 25% de agua y 75% de

1. Los volúmenes de alcohol y agua no son exactamente aditivos, pero como la diferencia en este caso no altera significativamente el resultado del juego no la tendremos en cuenta.

LA CIENCIA EN EL AULA

alcohol. La última tendrá 50% de cada uno de los líquidos. Si se desea, se pueden agregar al juego agua pura y alcohol puro. En todos los casos, será preferible usar alcohol absoluto o 96% y tratar de evitar otras graduaciones.

Luego, cada grupo pondrá sus mezclas en frascos que etiquetará de manera misteriosa: "X, Y Y Z", "María Laura, María Eugenia y María Emilia", o cualquier otro nombre de fantasía. Una vez logrado esto, cada grupo intercambiará las muestras con otro equipo. La consigna del juego es identificar a qué mezcla corresponde cada muestra.

Para identificar las muestras, los estudiantes deberán recurrir a las propiedades conocidas del agua y del alcohol. A fin de que la actividad sea exitosa, los estudiantes tienen que estar familiarizados con la idea de densidad y tienen que haber experimentado con algunas de las propiedades distintivas del agua y del alcohol, en particular con la inflamabilidad del último.' Las propiedades clave a medir serán precisamente la densidad de la mezcla y su inflamabilidad. También es posible medir la capacidad calorífica, pero esto supone cierto conocimiento sobre el tema "calor". El docente podrá probar qué otras propiedades dan resultados mensurables y se adaptan a su programa.

A fin de medir la densidad de cada muestra, los miembros de cada grupo procederán del siguiente modo. Primero verterán la muestra en una bureta graduada. Luego usarán la bureta para verter un volumen determinado, medido con la mayor precisión que ésta permita, en un vaso de precipitados tarado previamente, y lo pesarán en una balanza. A partir de las mediciones de volumen y masa se puede calcular la densidad.

La inflamabilidad de las mezclas puede ponerse a prueba en recipientes de boca ancha. Es preferible usar volúmenes pequeños en superficies relativamente amplias, como la de un vidrio de reloj, e intentar encenderlas. Los estudiantes no realizan una medición de la inflamabilidad sino que efectúan una estimación cualitativa que permite hacer comparaciones a fines de identificar las mezclas. Para ello es clave realizar comparaciones más o menos directas. Una posibilidad consiste en quemar las tres mezclas al mismo tiempo y ver cuál o cuáles se encienden, cuán sencillo

2. Existen numerosas formas de introducir estas propiedades de maneras explorativas o lúdicas; ver por ejemplo el caso de la "bola de aceite" en Furman y Zysman (2001).

3. En caso de medir capacidad calorífica, debe tenerse cuidado, por supuesto, de no usar un mechero cuando se tienen sustancias inflamables alrededor.

60.
Reacciones químicas: una exploración lúdica

es encender cada una o cuánto tiempo duran encendidas, o comparar cada una con alcohol puro. 0, mejor aún, puede dejarse a los alumnos proceder libremente y criticar sus abordajes a medida que ocurren, mediante diálogos socráticos.

Una manera de visualizar los resultados de las actividades realizadas es volcarlos en una tabla como la que exponemos a continuación. La densidad e inflamabilidad de las mezclas son fácilmente ordenables. Los estudiantes pueden establecer la identidad de las mezclas porque reconocen, aunque no sean enteramente conscientes de ello, que las propiedades de las mezclas son intermedias entre las propiedades de las sustancias originales. Nótese que no se trata simplemente de que observen sustancias entrando en disolución, sino que adviertan la noción, no necesariamente evidente, de que ciertos sistemas materiales, al ser mezclados, forman un sistema con propiedades intermedias con respecto a las de los sistemas originales. A este tipo de interacción entre sistemas líquidos se la denominará, más adelante, "mezcla" o "disolución". De esta manera, el concepto ha arribado primero, y la terminología vendrá después.

Tabla 1. 1. Modelo de tabla para volcar los resultados de los experimentos

<i>Muestra</i>	<i>Densidad (en gramos/mL)</i>	<i>Inflamabilidad (estimada desde 0 a +++)</i>	<i>Identidad de la muestra</i>
Alcohol puro	0, 78	++++	
Agua	1	0	
Muestra 1			
Muestra 2			
Muestra 3			

Comentario de la Actividad 2

Es importante, *antes* de encarar cualquier experimento, que los estudiantes verifiquen que las cintas (tanto la inferior como la superior) tengan poder atractivo; de lo contrario los resultados pueden ser confusos.

La pregunta 3 incita a los estudiantes a realizar predicciones sobre la base de lo que conocen. Pero además prepara el terreno para un resultado inesperado: las cintas se atraen en vez de repelerse. El mismo resultado puede obtenerse si una de las dos cintas perdió el efecto ámbar; por eso es importante comprobar que la propiedad esté presente en ambas cintas.

Al generar otro juego de cintas dobles los estudiantes pueden comprobar que las cintas "s" se repelen mutuamente y que las cintas "i" también. De esto se deduce que cintas tratadas de manera idéntica se repelen, pero que existen por lo menos dos tipos de tratamiento, porque existen casos en los cuales las cintas se atraen fuertemente. Las cintas "sencillas" (aquellas que no tienen otra cinta por encima) se comportan como cintas inferiores. La cinta superior y la cinta sencilla se atraen. La cinta inferior y la cinta sencilla se repelen. No hay ninguna manera de distinguir si una cinta es sencilla o inferior.

Aquí es interesante que el docente introduzca el siguiente desafío: "Yo voy a despegar dos cintas: una inferior y una superior, pero sin que ustedes miren. Si yo les doy entonces esas cintas incógnita, ¿pueden ustedes usar sus propias cintas para decidir cuál es superior y cuál es inferior?". Por supuesto que pueden: la cinta producida por ellos que atraiga a una cinta superior y repele a una cinta inferior es en sí una cinta inferior. Y viceversa. Hay que tener cuidado de que las dos pruebas recíprocas se realicen (es decir, probar tanto con cintas superiores como inferiores -la razón quedará clara al analizar la próxima pregunta-) y verificar que ninguna de las cintas en uso haya perdido su carga.

La pregunta 7 apunta a un experimento clave en la indagación. El docente debe subrayar que han encontrado dos tipos de cintas pero que pueden existir infinitud de otros tipos. Una cinta fue despegada de la mesa mientras que la otra fue despegada de otra cinta. ¿Será posible que distintas superficies generen distintos comportamientos? ¿Cómo se comportaría un tercer tipo de cinta? En principio podría atraer cintas de tipo "s" y de tipo "i". Toda cinta que atraiga a "s" e "i" pero repela a este nuevo tipo deberá ser clasificada como "tercera opción". Otra posibilidad sería un tipo de cinta que repela a ambas cintas. Nunca se han encontrado efectos de este tipo, y por eso creemos en la existencia de sólo dos tipos de carga.

Muchos estudiantes creen que hay algo mágico acerca del número dos. Hablamos muchas veces de "cargas opuestas". No hay nada de "opuesto" en los distintos tipos de carga; simplemente son distintas cargas, en cuanto pueden ser distinguidas en experimentos como los que acabamos de discutir.

Esta actividad es un magnífico ejemplo de cómo opera la ciencia: cierta evidencia apunta a la existencia de más de un tipo de cinta. Se comprueba con facilidad que hay dos tipos, pero no puede excluirse que existan otros. Concluir que sólo hay dos requiere infinidad de experimentos. ¿Cómo podemos estar seguros de que el día de mañana no encontraremos un tercer tipo de cinta que nadie encontró hasta ahora? En verdad, no podemos estar absolutamente seguros, pero cientos de años de búsqueda por parte de miles de científicos, curiosos, aficionados y estudiantes no han logrado encontrarla. Podemos decir entonces que estamos seguros, más allá de toda duda razonable, de que no hay un tercer tipo de cinta. Para la ciencia, no sólo es importante lo que encontramos, sino también lo que *no* encontramos (aunque podamos imaginarlo, así como en este caso imaginamos un tercer tipo de cinta).

ACTIVIDAD 3: SÍNTESIS GRUPAL

La Actividad 3 busca generar un consenso en la clase acerca de los fenómenos observados. Los estudiantes completan sus guías en forma personal, pero discuten sus resultados primero con sus compañeros de equipo y más tarde con toda la clase. Las discusiones generales permiten al docente enfocar las ideas y aportar datos históricos o dirimir disidencias sobre lo observado. Es posible que algunos experimentos deban repetirse a fin de alcanzar consensos.

Guía de preguntas

Actividad 3: Discusión sobre las observaciones

Para esta actividad primero trabajarás con tu grupo para después participar en una discusión de toda la clase sobre el tema.

•
Carga electrostática: una secuencia de actividades guiadas

1. Como consigna grupal, confeccionen una lista de todas las observaciones que vos y tus compañeros realizaron sobre las cintas adhesivas y sus poderes de atracción y repulsión. Es decir, hagan un resumen de las "reglas" que gobiernan estos fenómenos.
2. Una vez que todos los grupos hayan terminado con la consigna, la clase tratará de ponerse de acuerdo acerca de las observaciones sobre las cintas y su comportamiento. Toma nota de cualquier diferencia que surja entre los grupos. Estas diferencias deben ser debatidas y resueltas mediante la discusión, repitiendo experimentos si es necesario.
3. Con el fin de entenderse mejor entre sí, los científicos inventaron términos para referirse a las cosas que experimentaste. ¿Qué es la "fuerza eléctrica"? ¿Por qué eligieron la palabra "eléctrico"? ¿Qué quiere decir? ¿Qué quiere decir "electricidad vítrea" y "electricidad resinosa"?
4. ¿Cuál es la evidencia de que los objetos con carga del mismo tipo se repelen?
5. ¿Cuál es la evidencia de que los objetos con carga distinta se atraen?

Comentario de la Actividad 3

Ésta es la actividad que validará el conocimiento adquirido. Es importante que el docente modere esta discusión. Si dos grupos tienen observaciones diferentes, hay que repetir los experimentos hasta que todos observen lo mismo. (Aquí debe recordarse que un experimento no puede "dar mal", sino que, si se observan resultados diferentes, habrá que buscar una explicación basada en diferencias metodológicas e intentar resolver tales discrepancias a fin de asegurarse de que los datos hallados son perfectamente replicables por los distintos grupos.) Al final de esta actividad será apropiado introducir los términos técnicos correspondientes. Las "reglas" a las que el docente debe arribar son simples y ya las hemos discutido. El único problema que aparece con frecuencia es el falso descubrimiento de un tercer tipo de carga. Esto sucede cuando una de las cintas que está siendo puesta a prueba ha perdido la carga inadvertidamente. La repetición cuidadosa del experimento (asegurándose de que todas las cintas involucradas atraen objetos "neutros") resuelve esta cuestión.

Durante esta discusión el docente introducirá los términos técnicos ade-

cuados y contará parte de la historia del concepto de carga, refiriéndose a los experimentos y observaciones de Gilbert y Dufay. Es importante recalcar que los nombres "vítreo" y "resinoso" no reflejan nada en particular: son absolutamente arbitrarios. El vidrio no es la única sustancia que adquiere una carga vítrea, pero había que elegir un nombre y Dufay eligió ése. En realidad, un mismo material puede adquirir un tipo u otro de electricidad dependiendo de contra qué se lo frote. Con los instrumentos que tenemos a nuestro alcance, no es posible determinar si las cintas "i" y "s" son vítreas o resinosas.

Puede aquí también aclararse que "electricidad" es lo mismo que "carga" en este contexto. Una atracción (repulsión) eléctrica es la fuerza de atracción (o repulsión) debida a las cargas.

Las últimas dos preguntas de la actividad, que aluden a la evidencia de dos ubicuas aseveraciones, pueden presentar ciertas dificultades para los estudiantes. Es difícil, sin práctica previa, poner en palabras una serie complicada de razonamientos.

La evidencia de que dos objetos con la misma carga se repelen es que dos cintas tratadas de manera idéntica se repelen. Es más: dos partes de la misma cinta también se repelen. Dufay comprobó también que, si un objeto adquiere su carga por contacto con otro objeto cargado, entonces estos dos objetos se repelen. El hecho de que un objeto haya adquirido su carga por contacto con otro sugiere que tomó parte de esa carga y ésta por lo tanto deberá ser del mismo tipo. Este experimento no está incluido en la presente guía, pero puede ser discutido en el pizarrón.

La evidencia de que dos objetos con carga diferente se atraen es más sutil. La observación primaria es que hay ciertos objetos cargados que se atraen. Como ya hemos establecido que los objetos cargados de manera idéntica se repelen, esto justifica la afirmación de que los objetos cargados que se atraen *deben* tener dos tipos diferentes de carga. Estas dos observaciones tomadas en conjunto permiten ahora definir como cargas idénticas a aquellas que producen repulsión y como cargas diferentes a aquellas que se atraen. Nótese que en ningún caso hablamos de cargas "opuestas".

Es importante discutir estas preguntas en clase. Por un lado, brindan una oportunidad de analizar las evidencias detrás de nuestras aseveraciones, lo cual es un objetivo de todo programa en ciencias. Por otro lado, obligan a los estudiantes a detenerse a pensar qué entendernos por "iguales". El hecho de que cargas "iguales" se repelen suele aseverarse como si fuera un

dogma. No podemos tomar a la repulsión como definición de igualdad; la definición debe provenir de un criterio independiente, las cintas deben ser tratadas de manera idéntica. De lo contrario estaremos razonando en forma circular.

ACTIVIDAD 4: REPASO DE LO APRENDIDO

Esta actividad es un repaso de lo estudiado anteriormente para que los estudiantes revean, por su cuenta y en su casa, las ideas exploradas en clase y tengan la oportunidad de reflexionar sobre ellas. También es importante que intenten hacer explícitas sus ideas y que se vean forzados a explicarlas de manera coherente y

completa en forma escrita. Pero esta actividad en casa deberá ser complementada por otra en clase, en la cual la tarea del hogar se discuta y corrija de manera oral y grupal.

Guía de preguntas

Actividad 4: Para contestar en casa

1. Basándote en tus observaciones, escribí una definición, con tus propias palabras, del término "carga".
2. ¿Qué son "electricidad vítrea" y "electricidad resinosa"? ¿Cómo se comparan con nuestras cintas "s" e "i"?
3. De acuerdo con lo que aprendiste, ¿qué significan las palabras "eléctrico" o "electricidad"?
4. Si existiera un tercer tipo de carga, ¿en qué se diferenciaría de los otros dos tipos? ¿Cómo podrías saber si un objeto está cargado con este tercer tipo de carga? ¿Alguien ha observado este tipo de fenómenos?

Comentario de la Actividad 4

La electricidad vítrea y la resinosa corresponden a las cintas "s" e "i", pero mediante los experimentos realizados en clase es imposible determi-

nar cuál es cuál. Existe una forma de resolverlo. La electricidad resinosa es por definición aquella que adquiere un trozo de ámbar al ser frotado con pelo de gato. Una barra de acrílico frotada con pelo de gato adquirirá el mismo tipo de carga. Esta barra puede ser entonces comparada con cintas "s" e "i" y así determinar su tipo.

REFLEXIONES FINALES

Es interesante destacar que a lo largo de la secuencia de actividades descritas hemos usado la mayoría de las prácticas pedagógicas que elaboramos en el capítulo 1.

Nótese, por ejemplo, el cuidado puesto en no introducir terminología antes de tiempo. En las primeras dos actividades los estudiantes se familiarizan con la fenomenología básica de los materiales cargados. Al final de la actividad 2 han sido expuestos a una de las observaciones más importantes de esta historia: que existen dos tipos diferentes de carga. Pero la carga todavía se denomina "efecto ámbar" en la clase. Los alumnos sin duda conocen la palabra carga y la expresión electricidad estática, pero al llamar "efecto ámbar" a los fenómenos que se van observando, el docente pone énfasis en las ideas, desviando la atención de las meras palabras. Después de todo, decir *carga* no nos hace entender estos fenómenos. En ocasiones pensarnos que dos objetos frotados se atraen *porque* están cargados, cuando la realidad es la inversa: *decirnos* que los objetos están cargados porque se atraen o repelen.

Las presentaciones tradicionales introducen el tema declarando que existen dos tipos de carga. ¿Cuál es la evidencia? Pues bien: en las actividades de este capítulo está la evidencia al alcance de las manos (y la mente) de cualquier estudiante. Como se ve, los experimentos con cinta adhesiva no presentan dificultades técnicas y brindan a los estudiantes la posibilidad de ver por sí mismos la necesidad de invocar dos tipos de cargas para poder explicar todo el rango de observaciones. En ningún caso "vemos" dos tipos de carga; lo que observamos son cintas que se atraen y cintas que se repelen, e inferimos de ello que deben existir dos y sólo dos tipos de carga.

Finalmente, en las discusiones generales se introduce la terminología, cuando ya los estudiantes están más que familiarizados con los fenómenos. Los términos "positivo" y "negativo" no se introducen en esta guía. Su connotación casi matemática tiene ventajas y desventajas, como veremos en el

•

4

GAJES DEL OFICIO

Uno de los aspectos de la ciencia más visiblemente reconocidos es el de su metodología. En efecto, los científicos utilizan una serie de herramientas del pensamiento muy características que, desde nuestra postura pedagógica, deben estar reflejadas en la enseñanza de la ciencia. En otras palabras, si nuestro objetivo es que los estudiantes adquieran en cierta medida las formas de pensar propias de la ciencia, la metodología de la investigación científica resulta un aspecto clave en la enseñanza.

Lo que tradicionalmente se denomina "método científico" supone una serie ordenada de pasos para ir encontrando respuestas consistentes a preguntas bien planteadas relacionadas con lo que sucede en nuestro entorno. En este esquema, una pregunta estará bien planteada si admite ser contestada a través de experimentos u observaciones. Y la respuesta será consistente si otros científicos pueden obtener esa misma respuesta siguiendo los mismos pasos, es decir, si los resultados son reproducibles.

Cuando se describe esta serie de pasos, comúnmente se dice que el trabajo científico comienza con una observación que genera una pregunta, pasa por hipótesis y predicciones, sigue con más observaciones e inferencias, con el diseño y la ejecución de experimentos, la recopilación de datos, el análisis de esos datos obtenidos y culmina con la interpretación y presentación de los resultados. Cada uno de estos pasos, a su vez, supone otros. Por ejemplo, diseñar un experimento implica separar variables, hacer uso de

Controles y medir dichas variables. Analizar datos conlleva entender cómo se estiman los errores en la medición.

muy reconocido en su época. Los experimentos de Michelson para medir c se extienden durante 52 años, y los valores resultantes eran cada vez más bajos. El último resultado, publicado en 1932, da un valor de 299.774 km/seg con un error probable de 11 km/seg. Esta cantidad está por debajo del valor aceptado actualmente para c . Lo curioso es que el valor de Michelson de 1932 fue aceptado durante veinte años después de publicado, y hasta fue validado por experimentos de los años 1940 y 1941 hechos por otros investigadores, en Alemania y en los Estados Unidos, usando otro método. ¿Cómo era posible que usando técnicas distintas y trabajando en forma totalmente independiente los tres resultados coincidieran? Se ha sugerido que "un factor psicológico inconsciente hizo que los experimentadores posteriores buscaran errores en su propia técnica hasta poder hacer coincidir sus resultados con los del gran maestro Michelson" (paráfrasis de J. H. Sanders, 1965, p.17). El radar, desarrollado durante la Segunda Guerra Mundial, proveyó en 1951 la primera evidencia de que el resultado aceptado de c era erróneo. Pero esta evidencia, en su momento, pasó inadvertida o ignorada, hasta que fue confirmada con el correr de los años cincuenta por una variedad de métodos nuevos.

Como vemos en estos ejemplos, hay un lado muy humano en el aparentemente frío procedimiento científico: miedos, pasiones, ideas testarudas..., todo forma parte de la investigación. También las formas de investigar son tan variadas como las personalidades de los científicos que las implementan. Sin embargo, dentro de esta diversidad de temperamentos y de formas de proceder existen tácticas y estrategias que todos los investigadores usan como parte de "su método" y que constituyen las herramientas fundamentales para hacer ciencia. Por eso, si queremos que nuestros alumnos aprendan la esencia de este método, debemos enseñarles a usar las herramientas de investigación. James Bryant Conant, quien fuera alguna vez presidente de la Universidad de Harvard, Estados Unidos, lo expresa de la siguiente manera (Conant, 1957, p. vii):

Incluso un ciudadano altamente educado e inteligente sin la experiencia en investigación fallará casi siempre en entender la esencia de una discusión entre científicos sobre un proyecto de investigación. Esto no se deberá a la falta de conocimiento científico por parte del lego o a su incapacidad de comprender la terminología técnica del científico; se deberá en gran medida a su ignorancia fundamental de qué puede o no puede lograr la ciencia [...]. No tiene una "sensación" de Jo que podríamos llamar "las tácticas y estrategias de la ciencia".

Las herramientas de pensamiento del científico no son fácilmente codificables en "recetas" del método científico. Esto queda de manifiesto en el hecho de que los científicos en formación no aprenden el método leyendo libros, ni toman cursos en "metodología de la ciencia". Aprenden ciencia haciendo ciencia.

El problema, entonces, al querer trasladar al aula los aspectos metodológicos de la ciencia es que parecería que sólo quienes han realizado investigación científica por sí mismos, es decir, los científicos, pueden conocer las sutilezas de la metodología. Sin embargo, y sin desconocer los límites del trabajo en el aula, hay algunas prácticas pedagógicas que pueden contribuir a desarrollar este aspecto de la ciencia en la escuela.

EL ASPECTO METODOLÓGICO DE LA CIENCIA EN EL AULA

Para desarrollar herramientas de pensamiento acordes con la forma de conocer de la ciencia es sumamente importante que los estudiantes tengan la oportunidad de involucrarse personalmente en una investigación en la que intenten responder alguna pregunta de las que llamamos "contestables". Es deseable, si se puede, que se trate de una pregunta auténtica, planteada por ellos mismos o cuya respuesta sea significativa para ellos y no que sólo sirva para contentar al profesor respondiendo a una guía de trabajo. Las preguntas pueden ser de tipos diversos; lo esencial en esta recorrida por el "método científico" es el desafío de buscar explicaciones posibles y ponerlas a prueba. Para ello no es imprescindible contar con un laboratorio o equipamiento sofisticado, como ejemplificaremos en el capítulo 6.

Participar de las idas y vueltas (con sus frustraciones y alegrías) de una investigación es fundamental para construir la capacidad de pensar científicamente. La búsqueda de información, el desafío de pensar en explicaciones alternativas cuando los resultados contradicen lo esperado y la presentación y defensa de estos resultados ante pares son experiencias que, de ser solamente leídas o contadas, pierden en gran medida su valor vivencial y su poder educativo.

Otra estrategia útil para enfatizar el aspecto metodológico de la ciencia en el aula es el estudio de casos históricos en los que diferentes personajes resolvieron determinados problemas o respondieron ciertas preguntas. El fragmento de Conant citado más arriba, sin ir más lejos, pertenece a un libro publicado por la Universidad de Harvard en 1957, precisamente con el objeto de estudiar en detalle una serie de casos clave en la historia de la

ciencia que permiten ver claramente cómo se resuelven problemas científicos y con qué vallas internas y externas tropiezan quienes tratan de resolverlos. Este tipo de material puede ayudar a docentes de educación secundaria a tener un conocimiento más cabal de las sutilezas de la investigación, sin necesidad de convertirse en investigadores. Biografías, libros de historia e incluso obras de teatro y películas también pueden contribuir a ilustrar los vaivenes del trabajo científico y constituyen valiosos recursos para recorrer con los estudiantes historias de investigadores y sentirse más cerca de la realidad del trabajo científico. Según Edward O. Wilson (2002), entomólogo y divulgador de la ciencia, el poder de las historias en la enseñanza reside en la capacidad innata de los seres humanos de entender, disfrutar y recordar las narraciones.

A continuación analizaremos algunas de las herramientas utilizadas con mayor frecuencia en la investigación científica (los famosos "pasos" del método científico) y sugeriremos prácticas para que los alumnos se familiaricen con ellas. Si bien en esta explicación seguiremos el orden tradicional usado en la publicación de trabajos científicos, es importante tener en cuenta que, como ya hemos explicado, durante el proceso de investigación el orden de los pasos puede (y suele) ser muy distinto.

LAS PREGUNTAS

Como decíamos, detrás de toda buena investigación hay una pregunta de fondo que el investigador quiere responder. Los buenos científicos buscan afanosamente buenas preguntas, aquellas que son interesantes y contestables. En el aula, al igual que en la ciencia profesional, es importante fomentar en los alumnos el arte de hacer preguntas que conduzcan a investigaciones; en este sentido lo importante no es sólo la pregunta sino la forma en que se la plantea. Muchas veces sucede que preguntas muy interesantes están formuladas de tal manera que no conducen a experimentos claros. En ese caso, es necesario reformularlas de modo que podamos abordarlas, sea por experimentación o a través de observaciones. Con frecuencia nos preguntamos por qué sucede algo. Sin embargo, el "porqué" suele ser difícil de resolver: las preguntas que se refieren a mecanismos en vez de a causas (el "cómo" en vez del "porqué") son muchas veces más sencillas de contestar. No es tarea fácil, pero es importante que el docente guíe a los estudiantes a encontrar preguntas que puedan ser contestadas en-

píricamente, aunque a primera vista suenen menos interesantes. Muchas veces esto implica cambiar un "porqué" por un "cómo". En vez de tratar de develar por qué los circuitos en serie y en paralelo se comportan de manera diferente, podremos tratar de descubrir cómo fluye la corriente en las diferentes partes de cada circuito.

Puede suceder, también, que una pregunta esté mal imprecisamente formulada, y por ello no pueda ser respondida científicamente. Por ejemplo, cuando preguntamos por qué el tigre tiene rayas, podemos estar queriendo saber qué mecanismos celulares producen las rayas o podemos estar queriendo saber qué beneficio evolutivo conlleva tener rayas. Éstas son dos preguntas diferentes y es fundamental poder diferenciarlas a la hora de buscar formas de responderlas.

Muchas veces los textos y las clases de ciencia transmiten el conocimiento como si éste apareciera por generación espontánea, sin un acto de creación. Es como si, de la nada, sin motivos ni intereses, la verdad se revelara ante los ojos del investigador que la busca. El simple acto de recordar que detrás de los conocimientos generalmente hay preguntas es un primer paso para reconocer que detrás de ellos hay un proceso de búsqueda, de hipótesis fallidas y exitosas, de experimentos vanos y fructíferos, de resultados negativos y positivos.

El hacerse preguntas no es necesariamente una actividad espontánea sino una habilidad que debe desarrollarse y ser usada en forma deliberada. Los estudiantes deben salir a la "caza de preguntas" como primer paso para aprender a pensar científicamente.³

Por último, así como una pregunta genera un proceso de exploración que conlleva observaciones y experimentos, el proceso de exploración genera, a su vez, otras preguntas. De esta forma las preguntas se suceden unas a otras, pues el encontrar una respuesta genera varias preguntas nuevas.

LAS HIPÓTESIS

Apenas surge una pregunta, un científico imagina una o más respuestas o hipótesis posibles, que deberá luego someter a prueba. Las hipótesis pueden referirse a ideas acotadas e inmediatas (Creo que el ratón murió de hambre") o de mayor aplicabilidad y grado de abstracción ("Creo que

3. Este tema se desarrolla en forma más extensa en el capítulo 5.

la materia está constituida por *partículas* cargadas"). Una hipótesis no es una adivinanza descabellada, sino una suposición basada en la experiencia *previa*, los datos disponibles y el sentido común. En el aula, proponer hipótesis es un ejercicio importante, pero debe ser usado con mesura para no terminar negando el aspecto empírico de la ciencia. Cuando los estudiantes proponen hipótesis tras hipótesis, da la impresión de que lo importante es imaginar el mejor escenario posible para una situación, y quien produzca la hipótesis aparentemente más creíble habrá dado en el clavo. Es esencial recordar a los alumnos que toda hipótesis, por buena que parezca, debe ser validada mediante la observación y la experimentación. Las mejores hipótesis no son las más ingeniosas ni las que excitan fuertemente nuestro sentido común, sino aquellas que se pueden poner a prueba empíricamente.

Una hipótesis, por lo tanto, debe permitir realizar predicciones que puedan comprobarse mediante observaciones o experimentos. He aquí un ejemplo. En clase alguien pregunta: "¿Qué pasaría si pongo esta planta en ese armario?", y plantea una posible respuesta: "Las plantas necesitan la luz del sol para fotosintetizar. Basado en esta hipótesis, predigo que la planta se va a morir porque ese armario no tiene ni sol ni luz". Tras una semana se abre el armario y los alumnos se encuentran con una planta etiolada: amarillenta pero más crecida que la planta control que habían dejado a la luz. Sorpresa en el aula: hay que proceder a refinar la hipótesis.

En conclusión, proponernos fomentar en los alumnos el hábito de formular hipótesis basándose en preguntas del tipo "¿Qué pasaría si...?" (es decir, qué pasaría si cambio esto o aquello en el fenómeno observado). Si hay una hipótesis propuesta como en el ejemplo anterior (que dice que las plantas necesitan sol para fotosintetizar), la pregunta puede contestarse mediante una predicción basada en ella. A falta de predicciones basadas en explicaciones causales, el docente puede admitir la mejor conjetura que se pueda proponer con la información disponible. Esto último es lo que en la lengua inglesa se conoce como *educated guess*, y que puede traducirse como "conjetura educada" o "especulación fundamentada". Esta especulación, si bien tiene un carácter audaz, debe considerar los datos relevantes y obedecer al principio de parsimonia, es decir, ser la idea más sencilla posible que nos permite explicar los datos disponibles. Lo que no debe admitirse son las adivinaciones sin fundamento.

LAS OBSERVACIONES

Para corroborar o refutar una hipótesis generalmente es necesario realizar observaciones o experimentos. Para fomentar el hábito de hacer observaciones es útil exponer a los estudiantes a los fenómenos que deseamos analizar y darles la libertad, en la medida de lo posible, para estudiarlos de acuerdo con sus tiempos y su curiosidad, no con los nuestros. Parte del problema con esta forma de proceder es que, según nuestra experiencia, si pedimos a los alumnos que "observen", simplemente mirarán, echarán un vistazo, una ojeada. Para evitar este abordaje superficial, podemos guiar la observación de diferentes maneras. Si queremos que observen algo en particular, por lo general lo más honesto es simplemente llamar la atención sobre lo que nosotros mismos observamos." En biología, pedir a los estudiantes que produzcan un dibujo de lo que ven ayuda mucho a forzar una observación detenida. Con esta misma *lógica*, si requerimos descripciones verbales detalladas de lo que ven o de 10 que sucede, los alumnos tomarán conciencia de un mayor número de detalles.

Es importante que expliquemos a los alumnos la diferencia entre observación e inferencia o interpretación. Es común, por ejemplo, que al observar un vaso de soda un alumno describa que "se está escapando el aire". En rigor, lo que el estudiante está observando son burbujas que suben dentro del líquido. Decir que es aire conlleva una doble inferencia: asume que las burbujas son un gas y que ese gas es aire. Habría que atrapar las burbujas en un globo o bajo una columna de agua para tener un gas que se pueda someter a pruebas que lo identifiquen por sus características. Distinguir entre observaciones e inferencias es una práctica fundamental al explorar un fenómeno o interpretar los resultados de un experimento. La inferencia no es pura observación sino que implica una hipótesis tácita. De hecho, en una inferencia se realiza un salto lógico desde una observación a una idea no observada. Ciertos conocimientos previos sirven de puente y validan este salto.

4. En los museos participativos que siguen las excelentes normas pedagógicas del Exploratorium en San Francisco, Estados Unidos, el módulo interactivo invita al visitante a observar las características del fenómeno exhibido en carteles-consigna que dicen: "Fíjate en que... ". De esta forma, el diseñador del módulo guía al visitante hacia la observación de interés (véase <www.exploratorium.edu>).

El arte de observar también puede llevar al planteo de buenas preguntas.

Muchos investigadores fueron exitosos gracias a mantener los ojos abiertos constantemente a la búsqueda de cosas interesantes. Los buenos observadores son cazadores de patrones y regularidades: encuentran cosas que se repiten, que se ordenan de manera predecible, que ostentan simetrías, y se preguntan cómo explicar esas regularidades. Por ejemplo, prestan atención a los movimientos periódicos de un péndulo o de los astros en el cielo, o se preguntan: "¿Por qué esos árboles crecen cerca del río?". También buscan situaciones que rompan con ese orden o simetría: "¿Por qué esos árboles crecen sólo en la margen derecha del río?", o "¿Por qué a altas presiones los gases no se comportan como lo hacen a bajas presiones?". Los patrones en la naturaleza y aquellos sucesos que salen de lo habitual han despertado la curiosidad de las personas desde siempre y han incitado a la búsqueda de explicaciones. Para algunos investigadores, esa búsqueda de patrones o regularidades -y, en consecuencia, también la falta de los mismos- constituye ni más ni menos que el objeto último de la ciencia (Bateson, 1990). Estas observaciones pueden surgir de la contemplación de la naturaleza y sus fenómenos o pueden ser el registro deliberado de los resultados de un experimento.

LOS EXPERIMENTOS

Los *experimentos*, al igual que las observaciones, también pueden generar preguntas. Normalmente, un experimento busca resolver una cuestión, dar una respuesta a una pregunta, poner a prueba una idea. En cualquier caso se habrá de formular una hipótesis y los estudiantes deberán saber claramente cuál es el objetivo del experimento y cómo se logrará. El experimento deberá tener un resultado si la hipótesis se confirma y otro resultado distinto en caso contrario. Si el resultado esperado es el mismo, sea la hipótesis cierta o falsa, entonces el experimento es inútil-o bien la hipótesis ha sido mal formulada-o

Además, es importante constatar si un determinado resultado confirma nuestra hipótesis o si ese mismo resultado podría ser compatible con otras hipótesis alternativas. ¿Nos sirve este resultado para descartar una idea, la comprueba o sólo le presta un sustento parcial? Cuando realizamos experimentos en clase, muchas veces estas cuestiones quedan implícitas, y asumimos que los estudiantes están siguiendo la misma lógica que nosotros,

que hemos diseñado la experiencia o la conocernos de antemano. Por eso, es imprescindible ejercitar con los alumnos la capacidad de predecir resultados posibles en un experimento y reflexionar sobre qué significado tendría cada uno de esos resultados para que el experimento tenga sentido.

Al hacer una experiencia en clase, también debemos tener en cuenta cuáles son las posibles fuentes de variación y de error. ¿Será posible que el resultado que obtengamos se deba a factores externos al experimento? Existen varias técnicas para asegurarnos de que los resultados se deben realmente a lo que creemos que se deben. Estas técnicas incluyen el control de variables y los controles experimentales. No nos detendremos en el tema del diseño experimental ya que podría ocupar un volumen por sí mismo, pero es sin duda un tema fundamental que debe ser incorporado de una manera u otra dentro de la clase de ciencias. En el capítulo 6 proponemos experiencias concretas para ilustrar este tema.

Por último, hacer experimentos implica realizar mediciones. Es importante establecer que toda medición acarrea consigo errores. Por más precisa y cuidadosa que sea, no existe la medición exacta. Así, cuando decimos que una mesa mide $3,40 \text{ m} \pm 0,01 \text{ m}$, lo que estamos diciendo es que, si la medimos otra vez, hay una probabilidad del 50% de que la nueva medida esté entre $3,39 \text{ m}$ y $3,41 \text{ m}$. Los errores de este tipo, llamados errores probables o estadísticos, no significan equivocaciones sino que establecen los límites dentro de los cuales se conoce la cantidad medida. El buen experimentador es aquel que sabe estimar sus errores probables. Con frecuencia los estudiantes ofrecen respuestas a problemas cuantitativos con una serie descabellada de cifras significativas. Es bueno recordarles que un resultado de este tipo es absurdo si los instrumentos de medición o los datos originales no tienen el mismo grado de precisión. Por ejemplo, es absurdo decir que uno midió el pupitre con una regla y obtuvo un largo de $1,52378956 \text{ metros}$, ya que las reglas habitualmente tienen una graduación mínima de 1 milímetro , de modo que aun interpolando, el resultado de la medición no puede tener más de cuatro dígitos decimales.

LOS RESULTADOS

Después de realizar un experimento viene el análisis de sus resultados. Ésta es una actividad exclusivamente mental. De hecho, no es necesario que uno mismo realice el experimento para poder analizar sus

resultados. Una de las capacidades (y a veces uno de los deleites) de los científicos es poder criticar los resultados de otros, o incluso interpretar su significado. Francis Crick (uno de los descubridores de la estructura molecular del ADN) y Robert Oppenheimer (director del equipo de científicos que desarrollaron la bomba atómica en Estados Unidos) eran conocidos por su capacidad de interpretación de resultados ajenos. Esto quiere decir que no es necesario hacer experimentos todo el tiempo para desarrollar las habilidades críticas de un científico. Siempre que podamos, será enriquecedor presentar los datos que surgen de un experimento que otros han realizado y tratar de entender qué nos están diciendo estos resultados. ¿Podemos rechazar la hipótesis? ¿Son los datos significativos desde el punto de vista estadístico? También es posible analizar "experimentos mentales" (en inglés llamados *thought experiments*), que han cumplido un papel central en la ciencia desde sus inicios. Un ejemplo clásico es el de Galileo, quien imaginó qué sucedería si una bola rodara sobre una superficie infinitamente pulida, es decir, sin fricción. Su discusión se basa en un experimento imposible de hacer, pero útil de imaginar para desarrollar la idea de inercia.'

Los científicos expresan muchos de sus resultados en el lenguaje de la matemática. Este lenguaje es fundamental y caracteriza en gran medida la forma en que la ciencia conceptualiza y genera sus ideas. No se trata simplemente de cálculos de valores numéricos como los que los ingenieros deben realizar para predecir con precisión, por ejemplo, la altura que debe tener un puente. Muchas de las ideas principales que la ciencia ha producido fueron posibles sólo por el estudio cuantitativo de los fenómenos involucrados. La ley de la gravitación universal de Newton, que dice que todos los cuerpos materiales se atraen mutuamente, se deriva en parte de las leyes de Kepler, que son análisis cuantitativos de las órbitas de los planetas. La teoría atómica tiene su evidencia seminal en la ley de proporciones definidas de Proust. Las leyes de conservación (de cantidad de movimiento, energía, masa, carga, momento angular) son esencialmente cuantitativas y nos han dado una visión profunda y útil de la manera en que funciona el universo. Por ello consideramos importante desarrollar en las clases de ciencia casos concretos, como estos que acabamos de mencionar,

5. El ejemplo del experimento mental de Galileo será analizado en detalle en el capítulo 15.

en los que las mediciones cuantitativas han tenido impacto en la forma en que entendemos la naturaleza.

Sin embargo, a pesar del carácter cuantitativo de muchas investigaciones, todo científico recurre a la solución cualitativa de problemas antes de embarcarse en largos cálculos. Es decir, trabaja con órdenes de magnitud para tener una idea aproximada de los resultados, usa esquemas gráficos, tantea soluciones y resultados posibles, plantea tendencias, pregunta qué sucedería en casos límite, busca comparaciones con problemas semejantes. Es muy útil exponer a los alumnos a este proceder para que no adquieran el hábito de resolver problemas probando cuál de las fórmulas que ya conocen pueden aplicar. Es importante que puedan pensar en términos de órdenes de magnitud (¿la densidad del sólido es diez mil o cien mil veces mayor que la del gas?), entender la dirección de los cálculos (¿la velocidad va a aumentar o a disminuir?, ¿la aceleración va a ser positiva o negativa?) y manejarse con gráficos (¿qué forma tendrá la curva de oscilación del péndulo)?

Se ha dicho que "los científicos son exploradores en un universo de observables, buscadores de patrones y significados", o, en la versión de Niels Bohr (uno de los padres de la física cuántica e importante pensador del siglo XX), que "la labor científica consiste en extender el rango de nuestra experiencia y reducirla a una forma ordenada" (citado en Holton y Roller, 1958, p. 214). En este sentido, si el aspecto empírico de la ciencia consiste en "explorar un universo de observables" y en "extender el rango de nuestra experiencia", entonces el aspecto metodológico, tal como lo presentamos en este capítulo, nos da las herramientas para llevar a cabo esa exploración y extensión en forma disciplinada. La labor de buscar significados y de reducir nuestra experiencia a una forma ordenada es lo que llamamos el *aspecto abstracto* de la labor científica. El orden y los significados están dados por las leyes, los modelos y las teorías. De eso, justamente, hablaremos en el capítulo 7.

A continuación recapitulamos las prácticas pedagógicas sugeridas en este capítulo.

6. En el capítulo 8 mostraremos cómo se pueden resolver problemas astronómicos simples en forma cualitativa.

PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS :SUGERIDAS PARA DESTACAR EL ASPECTO METODOLÓGICO DE LA CIENCIA

- Analizar casos históricos de desarrollo de preguntas, hipótesis, experimentos y análisis de resultados.
- Entrenar a los estudiantes en el arte de *formular* preguntas deliberadamente.
- Fomentar en los estudiantes el hábito de preguntar "cómo" antes de "por qué".
- Desarrollar el hábito de preguntarse "¿Qué pasaría si. ... T " (es decir, qué pasaría si cambio variables en el fenómeno observado). A falta de predicciones basadas en explicaciones causales se pueden admitir "conjeturas educadas" pero no adivinanzas descabelladas.
- Incentivar en los estudiantes el hábito de formular hipótesis frente a cualquier pregunta.
- Promover en los estudiantes la costumbre de hacer predicciones basadas en la hipótesis formulada.
- Fomentar en los estudiantes la capacidad de observación y descripción de lo que miran.
Enseñar a distinguir entre observación e inferencia o interpretación.
- Estimular el diseño de experimentos que puedan contestar las preguntas o contrastar las hipótesis propuestas.
- Involucrar a los alumnos en experimentos en los que tengan que realizar mediciones para interpretar la validez o no de una hipótesis propuesta.
- Estimular en los alumnos la exploración de diversos tipos de metodologías alternativas o complementarias para la resolución de los experimentos.
- Cuando sea posible, resolver problemas en forma cualitativa antes de embarcarse en cálculos matemáticos.

A continuación, en el capítulo 5 se presentará una serie de ejemplos que abordan algunas de las prácticas mencionadas, involucrando a los alumnos en una "cacería" de preguntas, en la recreación de los experimentos controlados que Francesco Redi realizó para refutar la teoría de la generación espontánea, en la elección de sistemas experimentales para la determinación del origen del crecimiento de las plantas y, finalmente, en el desafío de reconstruir una fórmula desconocida a partir del aislamiento de variables.

IDEAS INVENTADAS

En este capítulo abordaremos el aspecto unificador y generalizador de las ciencias: la forma en que los científicos construyen explicaciones que sirven para ordenar y organizar una gran cantidad de fenómenos de la naturaleza y cómo logran hacerlo de la manera más económica y elegante posible.

CONCEPTOS Y ESQUEMAS CONCEPTUALES

J. B. Conant (1951) define la ciencia como "una serie de conceptos y esquemas conceptuales interconectados, que han surgido como consecuencia de experimentos y observaciones y que generan, a su vez, nuevos experimentos y observaciones". Desde este punto de vista la ciencia se nos aparece como un edificio de conceptos y esquemas conceptuales -lo que denominamos su *aspecto abstracto*- construido sobre una sólida base de experimentos y observaciones -su aspecto empírico- o Como hemos visto en los capítulos anteriores, los conceptos científicos más básicos, íntimamente ligados a los fenómenos, surgen de la experiencia directa de nuestros sentidos (por ejemplo, la carga eléctrica o la reacción química). Estos conceptos se relacionan entre sí constituyendo redes o esquemas conceptuales más abstractos (por ejemplo, las leyes de la mecánica clásica), que dan unidad a las observaciones y permiten explicar una gama grande de

fenómenos. Estos esquemas conceptuales están más alejados de nuestra experiencia sensorial directa: cuanto más alejados se encuentran, mayor será el rol que juegue en ellos nuestra imaginación -y aquí es donde entra en juego nuestra capacidad de abstracción- o Los esquemas conceptuales más amplios incluyen a los modelos teóricos y las teorías.

Los conceptos pueden definirse como ideas útiles porque nos permiten ordenar nuestras experiencias y sintetizarlas. Ziman (1968) da un ejemplo sencillo de esto empleando una idea de uso cotidiano. Supongamos que vemos un telón de teatro a medio subir y detrás de él cuatro palos de madera. Los palos se mueven en conjunto. Nuestra mente nos dice que allí hay una silla (aunque no la hemos visto). Así, el concepto "silla" nos sirve para explicar por qué los palos (las patas) se mueven al unísono y sentimos la confortable sensación de que todo encaja y tiene sentido. Además, si alguien mueve uno de los palos, la idea de silla nos permitirá predecir cómo se moverá el resto.

El concepto de silla es abstraído de nuestra experiencia y es de alguna manera un acto de invención de nuestras mentes. Éste es un ejemplo muy simple, pero sirve para ilustrar lo que sucede con construcciones teóricas más complejas: éstas se derivan de actos inventivos, que muchas veces implican una enorme imaginación (y a veces con resultados sumamente contraintuitivos). Albert Einstein, a quien todos identificamos con los aspectos más creativos de la ciencia, destacó que "los conceptos físicos son creaciones libres de la mente humana y no están, por más que lo parezca, determinados únicamente por el mundo exterior" (Einstein y Infeld, 1938).

Muchas de las nociones de la ciencia son construcciones teóricas producto de la invención humana. Los átomos, los genes, el calor, la energía y los agujeros negros son ejemplos de ideas científicas útiles para explicar fenómenos observados. El flogisto, el calórico, el éter y los efluvios también han sido ideas inventadas para explicar fenómenos observados, pero con el desarrollo de la ciencia y la tecnología dejaron de resultar útiles, y han sido por lo tanto descartadas y sustituidas por otras.

En nuestra discusión del aspecto abstracto del conocimiento científico nos centraremos en las características principales de ciertos esquemas conceptuales denominados "modelos teóricos". Como veremos, este enfoque es provechoso y rico ya que, por una parte, el uso de modelos es constante en la actividad científica y, por otra, en el aula entender cómo se construyen los modelos sirve de punto de partida para comprender cómo se elaboran las teorías.

LOS MODELOS TEÓRICOS: UN EJEMPLO

A principios del siglo XIX los trabajos de Lavoisier, Proust y otros químicos habían producido una serie interesante y relativamente ordenada de observaciones sobre las reacciones químicas. Sabían, entre otras cosas, que las sustancias podían combinarse y descomponerse, que los elementos permanecían constantes en todas estas transformaciones y que formaban compuestos en porcentajes fijos de masas.

En vista de este cúmulo de datos, el docente inglés John Dalton (1776-1844) propuso la hipótesis de que todas las sustancias (es decir, todos los objetos materiales) están compuestas de partículas de materia a las que llamó átomos.¹ Dalton sugirió algunas características que los átomos debían tener: ser extremadamente pequeños, indestructibles, inalterables y capaces de establecer vínculos con otros átomos. Con estas dotes, la idea de átomo se convirtió en una forma de imaginar la materia y entender su comportamiento en las transformaciones químicas, es decir, se constituyó en un modelo de la estructura de la materia. Mediante el uso de este modelo numerosas observaciones cobraban sentido. Por ejemplo, los elementos podían entenderse como sustancias compuestas de un solo tipo de átomo. El hecho de que los elementos pudieran ser recuperados después de transformaciones químicas podía entenderse a partir de la idea de que los átomos son indestructibles e inmodificables. Y que las sustancias tuvieran una composición fija de elementos podía entenderse suponiendo que cada tipo de átomo tenía un peso diferente, y cada tipo de compuesto, una fórmula característica.

La idea de átomo de Dalton fue enormemente fructífera no sólo para entender lo que ya se sabía, sino para predecir nuevas observaciones. Sobre la base de su idea, Dalton predijo la ley de proporciones múltiples y también la posibilidad de construir una tabla de pesos relativos de los átomos (la tabla periódica, que fue construida después de su muerte). Además, la idea de átomo permitió comprender la diferencia entre el estado gaseoso y

1. La idea original de átomo data de aproximadamente 400 a.e. y se le atribuye al griego Demócrito. Durante la Antigüedad y la Edad Media el atomismo fue una postura filosófica (sin evidencia empírica y asociada al ateísmo). En el siglo XVII muchos científicos importantes (Newton, Boyle, Hooke) profesaban esta visión filosófica. Pero recién con Dalton la idea deja de ser una especulación filosófica y se transforma en un modelo teórico.

los estados líquido y sólido. En los gases podemos imaginar que las partículas están muy separadas, lo que les da la propiedad de ser compresibles. En cambio, podemos imaginar que las partículas que constituyen un sólido se encuentran a la distancia mínima posible entre partículas ("se están tocando"), lo cual hace imposible la compresión.

UN MODELO TEÓRICO ES UNA REPRESENTACIÓN MENTAL

Por lo general, los modelos ofrecen una imagen física que nos permite formar una representación mental de lo que sucede en los fenómenos bajo estudio por analogía con otros fenómenos mejor conocidos. Así, en el modelo de Dalton de la estructura de la materia, los átomos nos remiten a una imagen cotidiana de pelotas o bolas de billar. Esta representación mental es útil aun sin saber qué forma tiene el interior de un átomo o cuál es su estructura íntima; nos permite imaginar, por ejemplo, cómo colisionan los átomos en la pared de un recipiente que contiene un gas. De forma parecida, un modelo de circuitos eléctricos, por analogía con un sistema circulatorio, postula un fluido que se mueve dentro de los cables. En términos de la utilidad del modelo, no hace falta saber qué es lo que fluye, en qué dirección fluye o ni siquiera si realmente algo fluye. Lo importante es que el circuito se comporta "como si" algo fluyera y que imaginarlo de este modo nos permite predecir una serie de resultados que de otra manera no resultan comprensibles.

Con frecuencia un modelo es sólo una analogía. Konrad Lorenz, uno de los padres de la biología del comportamiento, propuso que los instintos de los animales se despertaban "como si" un tanque interno se llenara de un líquido (cuanto más lleno esté el tanque, será más probable que se dé el comportamiento instintivo). Basó este "modelo hidráulico" en las ideas de Sigmund Freud, que describía el psiquismo humano en términos similares. Ninguno de los dos investigadores creía que existieran "reservorios" de líquido en un sentido real de la palabra, pero los modelos eran representaciones mentales útiles para pensar el sistema y predecir resultados.

Como vemos, la misma naturaleza práctica de un modelo hace que la representación mental sea lo más simple posible. Se trata de una abstracción de la realidad, una representación idealizada para poder concentrarnos en ciertos aspectos del fenómeno que queremos explicar, sin tener que incorporar toda la complejidad y los detalles de un sistema real.

La naturaleza misma de un modelo hace que tenga limitaciones en su rango de aplicabilidad. Por ejemplo, la teoría cinética de los gases trabaja con un modelo de gas ideal en el que las moléculas no interactúan (no se atraen ni se repelen), pero este modelo sólo se ajusta a la realidad a presiones muy bajas; al aumentar la presión es necesario modificar ligeramente el modelo. En la biología de las poblaciones muchos modelos simples asumen que todos los individuos de una población se comportan de manera idéntica, lo cual puede no ser cierto cuando existen jerarquías o diferencias de sexo o edad marcadas.

En su representación más abstracta y utilitaria, un modelo puede estar expresado en términos exclusivamente matemáticos, y es entonces lo que se llama un modelo matemático. En este tipo de modelo se eligen aquellas variables que mejor representan la realidad (para lograr predicciones útiles) y se establecen relaciones matemáticas entre ellas. En biología, la dinámica de las poblaciones en el tiempo puede modelarse matemáticamente. La meteorología, que lidia con sistemas y procesos altamente complejos, trabaja constantemente con modelos matemáticos del clima.

LOS MODELOS NO SON CIERTOS NI FALSOS

Los modelos, entonces, buscan ser una representación simple de un sistema, que nos permite imaginar lo que no podemos ver. Dado que la representación es lo más simple posible para poder concentrarnos en los aspectos del sistema que nos interesan, el modelo tiene limitaciones. Estas "mismas limitaciones nos llevan a entender que los modelos no son ni ciertos ni falsos: son solamente más o menos adecuados para describir la situación que se analiza. Apenas creado un modelo, el científico busca los puntos débiles, las limitaciones que le darán la pauta de cómo construir un modelo mejor. Por supuesto, un "buen" modelo tiene que ser lo suficientemente robusto como para soportar las pruebas experimentales derivadas de sus predicciones -en caso de que no sea así, no quedará más remedio que abandonarlo e ir en busca de un modelo alternativo que solucione las falencias del primero.

El científico, entonces, tiene una relación dual con su modelo. Por un lado, mediante un acto creativo de su imaginación, es el inventor del modelo. Por otro lado, al buscar los límites en las aplicaciones de su modelo, el científico se convierte en crítico de su propia creación.

Otro de los aspectos importantes de los modelos teóricos es que cambian con el tiempo a fin de acomodar nuevos datos, o bien porque son reemplazados por versiones más elegantes o económicas, o incluso simplemente porque pasan de moda.

Un interesante ejemplo es la evolución del modelo de la estructura interna del átomo. Es común en aulas de química y física encontrar en la pared láminas en las que un núcleo de átomo con forma de frambuesa está rodeado de un enjambre de aros concéntricos por donde circulan los electrones. Pero ¿cómo sabernos si el átomo es como lo muestra la lámina? Las propiedades del átomo descritas en la lámina (la presencia de un núcleo y las órbitas de electrones) no son observables a simple vista, ni siquiera pueden verse con los más potentes aparatos de magnificación. En realidad, nuestra visión de la estructura atómica no se deriva de observaciones directas de ninguna especie, con o sin aparatos que aumenten nuestros sentidos: se trata, insistimos, de un modelo creado por la imaginación a fin de dar cuenta de numerosas observaciones y resultados experimentales.

A principios del siglo XX aparece el primer modelo moderno de la estructura del átomo. La idea primitiva del átomo de la época de Dalton se había enriquecido con el descubrimiento de que ciertos objetos eran capaces de adquirir carga eléctrica, lo que llevó a pensar que los átomos debían contener partículas cargadas. J. J. Thomson identificó y caracterizó a los electrones como partes constitutivas de todos los átomos. Como los electrones tienen carga negativa y el átomo es eléctricamente neutro, se hacía necesario postular algo con carga positiva dentro del átomo. A principios del siglo XX Thomson propuso un modelo que consistía en visualizar el átomo como una masa cargada positivamente con electrones negativos, distribuidos como las semillas en una sandía o la fruta abrillantada en un pan dulce. Los experimentos indicaban que los electrones negativos eran extremadamente pequeños comparados con el resto del átomo, y ése es el resultado que sugirió a Thomson la idea de las semillas de sandía.

Hacia 1910, J. Rutherford bombardeó láminas de muy pocos átomos de espesor con rayos que él sabía que eran haces de minúsculas partículas. Estas partículas veloces que atravesaban las láminas eran sin embargo sustancialmente más pesadas que los electrones. El modelo de Thomson, con las cargas repartidas en forma homogénea, predecía que las partículas veloces y pesadas usadas para bombardear las láminas deberían pasar a través de ellas casi sin desviarse de rumbo. Pero los experimentos de Rutherford

indicaban que, en cambio, algunas partículas (no todas) volvían para atrás, como si hubieran rebotado contra una pared.

Rutherford describe su impresión cuando un miembro de su equipo le refiere el resultado del experimento:

Es lo más increíble que me ha sucedido en la vida. Era casi tan increíble como si hubiera disparado una bala de 20 cm hacia un blanco de papel de seda y la bala hubiera vuelto para atrás y me pegara. [...]
Hice unos cálculos y vi que era imposible obtener un resultado de ese orden de magnitud a no ser que se supusiera un sistema en el que la mayor parte de la masa del átomo estuviera concentrada en un pequeñísimo núcleo (citado en Holton y Roller, 1958, pág. 615; el destacado es nuestro).

Rutherford modificó entonces el modelo de Thomson para acomodar sus resultados y propuso que un núcleo con carga positiva estaba rodeado de electrones pequeñísimos, y que el átomo era en su mayor parte puro vacío. Pero nótese que Rutherford no observó esa estructura, sino que debió "hacer unos cálculos" para poder empezar a concebirla.

El modelo de Rutherford no resolvía la cuestión de por qué los electrones negativos no caían hacia el núcleo positivo. Algunos intentaron explicarlo comparando al átomo con el sistema planetario solar: al igual que los planetas giran alrededor del Sol, los pequeños electrones negativos se movían en órbitas alrededor del núcleo masivo. En el caso del sistema solar los planetas no caen hacia el Sol porque hay un balance de "fuerzas" que hace que permanezcan en sus órbitas. Pero en el caso de cargas que giran en sus órbitas, la teoría clásica de electromagnetismo predecía que los electrones debían radiar luz en forma continua y, al perder energía, caer hacia el núcleo. Esto contradecía las observaciones, dado que el experimento de Rutherford indicaba una estructura estable del átomo.

Niels Bohr encontró la salida a este problema cuando, en 1913, incorporó al modelo planetario los conceptos, recientes en ese momento, de la teoría cuántica. Con electrones que emiten radiación sólo en forma cuantificada, las órbitas se volvían estables y el modelo viable. Es éste el modelo atómico que se representa en la mayoría de las láminas escolares.

Actualmente el modelo de Bohr ha sido reemplazado. Hacia el año 1925 las ideas claras y simples de órbitas y saltos de electrones fueron suplantadas por una visión probabilística de los sucesos atómicos. En vez de órbitas

2. O sea, en paquetes discretos o "cuantos".

40.

Los astros celestes: el uso de un modelo

149

se mueven en las órbitas astrales o con un tablero de felpa y astros de velero o felpa.

Recalquemos: el objetivo de las actividades es mostrar la utilidad del modelo geocéntrico para resolver problemas cualitativos en forma simple e intuitiva. Nos hemos limitado a predecir los movimientos de la Luna, el Sol y las estrellas zodiacales, sin considerar para nada a los planetas. Históricamente lo que inclinó la balanza que equiparaba las virtudes de los dos modelos a favor de la causa heliocéntrica fue, justamente, el análisis de los movimientos de los planetas. Es posible y útil extender el abordaje antropomórfico que hemos descrito para visualizar el movimiento de los planetas en ambos sistemas y reconocer que, en este caso, la simplicidad está del lado del sistema heliocéntrico.

PARTÍCULAS CARGADAS: LA CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO

Existe una gran variedad de fenómenos extraños que muchos objetos exhiben al ser frotados: atraen pequeños trozos de papel, se atraen y repelen mutuamente, producen chispas que saltan por los aires y nos ponen los pelos de punta. Tales fenómenos, llamados "eléctricos", obedecen a ciertas reglas sencillas que hemos explorado en el capítulo 3. En este capítulo intensificaremos la exploración y examinaremos por qué se producen estos fenómenos y qué sucede dentro de los objetos que los exhiben. Para ello desarrollamos una guía de actividades que ayuda a los estudiantes a construir **un** modelo de la constitución interna de los objetos que da cuenta del comportamiento de los mismos cuando se los carga eléctricamente.

EFLUVIOS Y FLUIDOS: MODELOS DE ATRACCIÓN Y MODELOS DE TRANSMISIÓN

Cuando el inglés William Gilbert, a principios del siglo XVII, estudió con detalle las atracciones por frotamiento (es decir, las fuerzas eléctricas), descubrió que algunos objetos (como el vidrio, la cera, el ámbar y otras resinas) podían adquirir esta virtud y otros no (los metales). Las atracciones de los materiales eléctricos eran interacciones a distancia y Gilbert sostuvo que se debían a emanaciones de una especie de hebras invisibles a las

que llamó "efluvios". Muchos de los experimentos llevados a cabo en esa época buscaban establecer la naturaleza de estos efluvios (¿son sólidos o tenues?, ¿pueden atravesar materiales?). Nadie podía ver los efluvios: se trataba de una idea inventada para poder explicar lo que se veía, es decir, era un *modelo* de la atracción eléctrica. (Ideas parecidas habían sido propuestas para explicar la atracción gravitatoria.) Sin embargo, no existía ninguna manera de medir las características de los efluvios y la idea no parecía producir muchas predicciones útiles.

Stephen Gray (1666-1736), también en Inglaterra, inició una línea de indagación distinta, que resultó más fructífera. En vez de concentrarse en el mecanismo de acción de la atracción eléctrica, observó que ésta podía migrar de un objeto a otro y se preguntó cuán lejos podía llegar. Se dedicó a cargar objetos y luego a pasar la carga a otro mediante un "conector" que podía ser una barra de vidrio o de madera ¹. En un experimento colgó esas barras del techo de un granero con hilos de seda. El experimento funcionó varias veces hasta que los hilos se rompieron. Los cambió entonces por hilos de cobre, pensando que serían más resistentes al peso, pero el experimento dejó de funcionar. Al investigar este percance, Gray notó que algunos materiales transmitían la propiedad de atracción (los conductores) y otros no (los aislantes). Los buenos conductores no son fáciles de cargar: la lista de "eléctricos" de Gilbert está constituida por malos conductores.

El hecho de que la propiedad eléctrica pudiera migrar de un objeto al otro sugirió a los investigadores de la época que se trataba de un fluido eléctrico, una sustancia que se movía con mayor facilidad en algunos materiales (conductores) y con menor facilidad en otros (aislantes). Se comenzó a hablar entonces de "cargar" a un objeto de fluido eléctrico, y de ahí proviene la palabra "carga". Como los efluvios, la idea de este fluido es totalmente inventada a fin de visualizar lo que está ocurriendo. Se trata de un modelo teórico de la *transmisión* de la propiedad eléctrica.

Dufay descubrió posteriormente que existían dos tipos distintos de carga², lo que permitió comenzar a visualizar la existencia de dos fluidos dis-

1. Si bien la madera es considerada un mal conductor, Gray trabajaba en un clima húmedo que aumentaba la conductividad de los objetos.

2. Véase el capítulo 3 para una exploración más detallada de las ideas de Dufay y la evidencia de dos tipos de cargas.

tintos en vez de uno solo: un fluido para cada tipo de carga. Esto condujo a la idea de que los objetos neutros contienen igual cantidad de cada tipo de fluido, cuyos efectos se cancelan dentro del objeto para producir un efecto neto nulo.

Esta idea de que un objeto contiene igual cantidad de los dos fluidos eléctricos fue fructífera. Aunada con la teoría atómica, que dice que todos los objetos están constituidos por átomos, uno de los corolarios de esta idea es que los átomos deben contener ambos fluidos en su interior. A partir de este razonamiento los científicos comienzan a hablar, no ya de fluidos, sino de partículas cargadas dentro de los átomos. Cuando los átomos pierden alguna de sus partículas constitutivas, los objetos que conforman adquieren una carga neta medible. El "fluido eléctrico" pasa entonces a visualizarse como la migración (de un objeto a otro o de una parte de un objeto a otra) de minúsculas partículas subatómicas dotadas de "carga", es decir, de propiedades eléctricas inherentes. A diferencia de los objetos macroscópicos, las partículas subatómicas estarían inherentemente cargadas (no pueden perder sus permanentes propiedades eléctricas). Finalmente, en el siglo XX, I. J. Thomson determinó que los rayos catódicos son haces de partículas cargadas negativamente, a las que llamó "electrones", moviéndose a grandes velocidades. Esto consolidó la idea de que en el interior de cada objeto material existen partículas cargadas eléctricamente. Nos centraremos en esta idea en el presente capítulo y exploraremos la construcción del modelo que originó.

SECUENCIA DIDÁCTICA: CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE CARGA

El trabajo en esta secuencia de actividades se hará mediante una guía de preguntas escritas para los alumnos y también a través de la intervención del docente para orientar las discusiones. Los experimentos y las observaciones jugarán un rol importante, pero el papel principal lo tendrán las discusiones de ideas abstractas, y aquí el docente deberá mostrar su pericia como moderador y guía.

Los experimentos de cada una de las actividades pueden realizarse en clase o, si se carece de tiempo, pueden ser discutidos por el docente mediante dibujos en el pizarrón y explicaciones detalladas. En este caso el docente deberá ser cuidadoso y explicar los resultados de los experimentos sin revelar las características del modelo, dejando así espacio para que los estudiantes hagan sus propias interpretaciones.

El objetivo principal de esta secuencia didáctica es que, dado un conjunto de observaciones, los estudiantes comprendan cómo se construye un modelo teórico para explicarlas. Lo ideal es que los estudiantes participen activamente en la creación de este modelo pero, como se trata de un producto de la imaginación, no se puede pretender que los alumnos imaginen la idea adecuada en el momento adecuado. El docente deberá encontrar un equilibrio entre su propio protagonismo y el de sus estudiantes, para lograr que lleguen al resultado esperado y aprecien el rol de la creatividad en la formulación de este tipo de ideas.

LA HERRAMIENTA BÁSICA: EL ELECTROSCOPIO

La mayor parte de los experimentos propuestos o analizados en este capítulo se realizan usando un electroscopio. El electroscopio que vamos a usar (los hay de muchos tipos, muy diferentes) es muy sencillo, como muestra la figura 9.1. Consiste simplemente en un frasco con una tapa de material aislante (puede ser plástico). La tapa está perforada de tal manera que un alambre conductor (metal) cuelga en el interior del frasco pero está conectado con una bola de metal (que bien puede ser un pedazo de papel de aluminio abollado) en la parte exterior del frasco. El alambre dentro del frasco termina en forma de anzuelo y de él cuelgan dos tiritas de papel de aluminio.

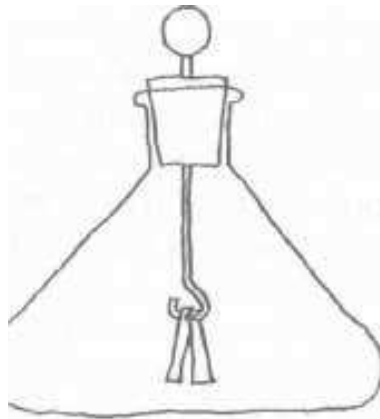


Figura 9.1

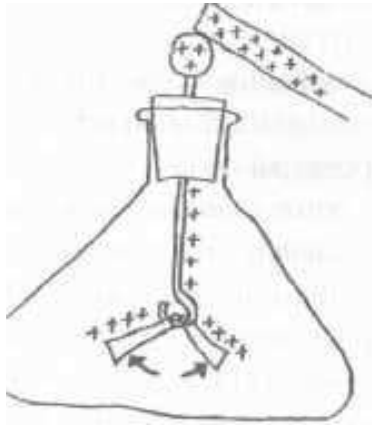


Figura 9.2

Cuando un objeto cargado toca la bola metálica exterior, la carga migra por el alambre hacia las tiritas de aluminio. Estas hojuelas se cargan, entonces, con el mismo tipo de carga (proveniente del objeto que toca la bola) y tienden a separarse desafiando la gravedad (figura 9.2). El instrumento puede usarse para determinar la intensidad de la carga: mayor separación indica mayor carga. Pero no puede usarse para determinar el *tipo* de carga porque ambos tipos producirán el mismo efecto: la separación de las hojuelas. Éste es un punto que conviene recordar frecuentemente a los estudiantes.

Los electroscopios deben ser contruidos y probados antes de realizar la actividad. Aunque parezca simple, su uso puede resultar trabajoso. En un primer intento el electroscopio puede no funcionar o funcionar mal. Por ejemplo, las hojuelas pueden separarse ante el contacto con un objeto cargado pero caer inmediatamente cuando se lo retira, a pesar de que en teoría las hojuelas deberían retener la carga otorgada hasta que otro objeto toque la bola metálica y le "robe" la carga. Generalmente la caída prematura de las hojuelas se debe a que el electroscopio cede la carga a objetos o sustancias (como el agua en el aire) en su entorno. Por lo tanto, habrá que verificar que los materiales utilizados sean buenos aislantes -a excepción de las hojuelas, el alambre y la bola metálica- y que el medioambiente no sea demasiado húmedo. Según nuestra experiencia, los experimentos aquí descritos son repetibles *si* se seca previamente el exterior y (esto es muy importante) el *interior* del frasco con un secador para pelo.

46.

47. sucede dentro de esos objetos, qué puede ser lo que les otorga las propiedades eléctricas. En los siglos XVII Y

156

LA CIENCIA EN EL AUI

Partículas cargadas: la construcción de un modelo XVIII era muy razonable pensar que una

ACTIVIDAD 1: OBSERVACIÓN DE LA CONDUCCIÓN DE LA CARGA

propiedad se desplazaba a causa de un agente móvil, posiblemente de una sustancia que fluía. Si los

En esta actividad los estudiantes frotarán barras de acrílico y/o de vidrio sobre distintas telas y comprobarán, usando el electroscopio, que las barras estén cargadas. El objetivo principal de la actividad es llamar la atención de los estudiantes acerca del comportamiento de las hojuelas del electroscopio, que adquieren su carga indirectamente sin entrar en contacto directo con el objeto cargado. De esto se puede inferir que la carga debe haber migrado a través del alambre. Advertirán también que el frasco no está cargado (esto se comprueba mediante el uso de cintas -véase el capítulo 3- u otro electroscopio). De esta experiencia se concluye que ciertos materiales son buenos conductores y otros no. Durante esta actividad el docente puede describir los experimentos de Gray sobre la conducción de carga descritos más arriba.

estudiantes no pueden visualizar este mecanismo de acción, entonces el docente deberá proponerlo y pre-

Guía de preguntas

guntar si tiene sentido, si la idea es consistente con lo que sucede. Al mismo tiempo el docente deberá

El electroscopio y la conductividad

1. Un electroscopio es cualquier instrumento que puedas usar para determinar si un objeto está cargado o no y, hasta cierto punto, cuán intensamente cargado está. Tu profesor te proporcionará uno. Carga por frotamiento una barra de acrílico o plástico y después usala para tocar el metal en la parte de arriba del electroscopio. ¿Qué sucede con las hojitas de papel de aluminio dentro del electroscopio? ¿Por qué, en tu opinión, sucede tal cosa?
2. Las hojitas de papel de aluminio, ¿fueron frotadas contra alguna otra superficie? ¿Están cargadas? Si están cargadas, ¿cuál es tu evidencia? ¿Cómo adquirieron su carga?
3. ¿Está cargado el vidrio del frasco? ¿Cómo puedes estar seguro? ¿Cuál es tu evidencia?
4. ¿Qué sucede con las hojitas de papel de aluminio cuando la barra cargada ya no está tocando el electroscopio?

recaltar que no existe evidencia directa de la existencia de este fluido, sino que se trata de una idea que

ACTIVIDAD 2: ¿QUÉ ES LO QUE FLUYE?

inventamos para poder visualizar qué es lo que sucede, y cuya utilidad pondremos a prueba en actividades por

Ahora que los estudiantes saben que la carga puede desplazarse de un objeto a otro, el docente les propondrá que traten de imaginar qué

Ejercicio

b: Problemas

1. Imagínate que alguien te da un objeto (una regla, un globo), ¿cómo podrías hacer para determinar si el objeto está cargado eléctricamente o no?
 2. Imagínate que alguien te da dos objetos cargados. ¿Cómo harías para determinar si poseen el mismo tipo de carga o cargas de tipo diferente?
 3. Supone que te dan un objeto eléctricamente cargado. ¿cómo podrías hacer para determinar si la carga es positiva o negativa?
 4. Los siguientes experimentos son para que los realices en tu casa, usando cinta adhesiva³ e imanes: a) ¿Qué pasa cuando acercas una cinta cargada a un imán?; b) ¿Pasa algo diferente si inviertes el imán?; c) ¿Pasa algo distinto si inviertes la cinta?; d) ¿Es posible hacer que un imán repela a una cinta?; e) ¿Hay una reacción distinta con imanes si la cinta es superior o inferior?; f) Escribe, basado en tus experimentos, cómo podrías hacer para determinar si un objeto desconocido es una imán o no usando solamente cintas adhesivas cargadas.
 5. Considera los siguientes experimentos. Un objeto A (por ejemplo, un globo) es atraído por una barra de plástico. Cuando el globo toca la parte metálica exterior de un electroscopio, las hojitas de papel de aluminio se separan. Un objeto B (digamos, una regla de plástico) toca la parte metálica exterior de otro electroscopio y las hojitas también se separan. Ahora colocas el objeto B cerca del electroscopio que estaba en contacto con A (pero sin tocarlo). Las hojitas que estaban todavía separadas caen juntas; cuando el objeto B se aleja del electroscopio, las hojitas vuelven a separarse.
 6. Para cada una de las siguientes afirmaciones, especifica: 1) si la afirmación es verdadera, falsa o si la información provista es insuficiente para decidir; 2) en qué forma la evidencia en el texto sostiene (o refuta) la afirmación, o qué tipo de información impide determinar la veracidad de la misma.
3. véase experimentos con cintas cargadas en el capítulo 3

onalizada. Este consenso más amplio involucra a la comunidad científica internacional.

171

El consenso general entre científicos se establece a través de numerosas vías de comunicación. En los albores de la ciencia moderna, los científicos se comunicaban únicamente por carta o a través de visitas personales. Hay ejemplos de correspondencias, como la de Faraday (James, 1991), que dan una idea clara de este tipo de intercambio. Recién en el siglo XIX aparecieron las sociedades científicas, uno de cuyos objetivos era establecer quién tenía prioridad en los descubrimientos. Estas sociedades comenzaron a publicar las primeras revistas científicas y a organizar congresos (Boorstin, 1986). Actualmente existe una enorme cantidad de publicaciones (en papel y digitales), encuentros y simposios, y los investigadores intercambian ideas por teléfono y correo electrónico. Las revistas científicas informan a la comunidad de investigadores cuáles son los últimos descubrimientos en diferentes áreas y esto (junto con los congresos y otros múltiples intercambios de ideas y resultados) va construyendo un consenso sobre cuáles son las cosas que la comunidad científica "sabe" o acepta.

El sistema de comunicación científica clásico en nuestros tiempos es el *paper* publicado en una revista especializada (la palabra castellana es "artículo", pero muchos científicos de habla hispana usan el término inglés). Estas revistas son publicadas en forma semanal, mensual o bimensual y reúnen artículos de diversos temas. Algunas revistas son de interés general (como *Science* o *Nature*) y otras son muy específicas (como *Neuron* o *Physical Review*). El cuerpo principal de estas publicaciones son artículos enviados por grupos de investigación en los que se presentan nuevos descubrimientos o ideas y se detallan los métodos utilizados y la evidencia que los respalda. Además las revistas tienen comentarios, cartas de lectores y otras secciones que hacen a la vitalidad de la comunidad científica. Los artículos, sin embargo, deben atravesar por un riguroso examen antes de ser aceptados para su publicación. Primero, el equipo científico manda el artículo a la revista. Los editores, entonces, envían copias del artículo a tres o cuatro expertos en el área, que deben permanecer anónimos. Estos árbitros analizan el trabajo y emiten su opinión, normalmente cuestionando el alcance de las conclusiones

- a) El objeto A está eléctricamente cargado.
- b) El objeto A está cargado negativamente (y es por eso que las hojitas se separan).
- c) El objeto A está cargado positivamente (y es por eso que las hojitas se separan).
- d) El objeto B es neutro.
- e) Los objetos A y B tienen cargas diferentes.
- f) Los objetos A y B deberían repelerse.

CONCLUSIÓN

El objetivo de esta secuencia didáctica es desarrollar algunos conceptos abstractos acerca de la idea de carga electrostática. La guía hace uso de observaciones directas y de experimentos (y en este sentido puede decirse que responde al aspecto empírico de la ciencia también), pero las actividades centrales van más allá de los fenómenos observables. La idea de carga como un fluido o como la expresión de partículas móviles no se deriva directamente de los fenómenos electrostáticos. Es inventada ingeniosamente para explicarlos y es por lo tanto consistente con las observaciones. Como hemos comentado, es una falacia afirmar que el conocimiento científico se desprende lógicamente de las observaciones que hacemos. Existe un elemento de creatividad e invención que va más allá de los datos empíricos.

Esta característica básica de los modelos teóricos-el hecho de que tienen elementos que son fruto de la creación imaginativa-determina en gran parte la forma de enfoque que se le debe dar al tema en el aula. En primer lugar, los estudiantes deberán estar familiarizados con los fenómenos básicos; de lo contrario toda la idea de cargas y partículas cargadas en movimiento resultará oscura para ellos. Es por lo tanto conveniente realizar las actividades propuestas en esta guía después de haber realizado las actividades descritas en el capítulo 3 de este libro. Finalmente, al experimentar y apreciar el carácter inventado de las ideas del modelo (y asimismo cómo estas ideas cambian y se desarrollan) los estudiantes tendrán la oportunidad de enfrentarse con la riqueza de la idea abstracta de carga y de partícula cargada, y con los mecanismos por los cuales los investigadores construyen el conocimiento científico.

CUARTA PARTE

El aspecto social de la ciencia

ACUERDOS, DEBATES E INFLUENCIAS

En su libro *Uncommon Sense*, el físico Alan Cromer describe a la ciencia como una extensión de la retórica, es decir, como una actividad en la cual se utilizan debates para persuadir a otros (Cromer, 1993). Según Cromer, en ciencia el tema a debatir es algún aspecto de la realidad, y las conclusiones (esas “verdades” que calificamos de científicas) no son sino el consenso de la comunidad de “debatidores”. Cromer basa muchas de sus ideas en las del físico John Ziman, quien define a la ciencia como el “consenso de opinión racional entre investigadores competentes” (Ziman, 1968). En este sentido, la ciencia es una construcción social y este es el aspecto que discutiremos a continuación.

El aspecto social de la ciencia vuelve a subrayar cuán opuesta es la ciencia a la verdad relevada. En la ciencia se necesitan datos empíricos que sustenten o validen lo que decimos, y que deben ser verificables por otros. Además, las interpretaciones y conclusiones que se sacan de esos datos pueden ser aceptadas o refutadas por cualquier otro científico. No hay lugar en la ciencia para el conocimiento personal basado en experiencias intransferibles, como es el caso, por ejemplo, de la religión o el arte. Dicho de otro modo, si lo que decimos o descubrimos no es verificable (por repetición de nuestros experimentos o nuestras observaciones) entonces cae fuera del ámbito

de la ciencia. El conocimiento científico es, por lo tanto, un conocimiento público.

EL CONSENSO EN LA INVESTIGACIÓN PROFESIONAL

Pocos alumnos de la escuela media conocen la dinámica de trabajo de los equipos de investigación, como por ejemplo el hecho de que habitualmente los grupos tienen una reunión semanal en la que participan todos sus miembros: desde el investigador principal o "jefe" hasta los estudiantes que comienzan a dar los primeros pasos en investigación, pasando por varias categorías de científicos. En estas reuniones, uno de los miembros del equipo presenta oralmente sus resultados e ideas mostrando con claridad los resultados obtenidos en cada experimento y cómo se analizaron y se sacaron las conclusiones. Los colegas, entonces, proponen nuevas rutas de abordaje cuando los experimentos no salen, tratan de participar en la construcción de modelos explicativos, alertan sobre temas relacionados que aparecen en la literatura específica (por ejemplo, si otros científicos en el mundo han investigado esas ideas o hecho experimentos similares, si alguien encontró un resultado opuesto, si hay otras técnicas posibles que se pueden usar para abordar la misma pregunta, etc.). Más que nada, en las reuniones de grupo se desmenuza la presentación de un trabajo y se buscan posibles fallas en los procedimientos, argumentos y razonamientos con el fin de mejorarlo. En el proceso del trabajo cotidiano del grupo se va logrando consenso.

Francis Crick, quien junto a Watson determinó en 1953 la estructura tridimensional del ADN, dijo en una ocasión que el alma de la colaboración científica es "el perfecto candor, y la rudeza si es necesaria". Un buen científico, afirmó, valora la crítica casi tanto como la amistad. Es más: según Crick, en ciencia la crítica es la medida de la amistad (citado en Judson, 1996). Por supuesto, la visión de Crick se aplica a toda discusión racional donde lo que importa son las evidencias y no las cuestiones personales.

LA CIENCIA PÚBLICA Y LA VALIDEZ DEL CONOCIMIENTO CIENTÍFICO

Más allá del consenso interno (dentro de los equipos de investigación) que produce hipótesis de trabajo útiles al grupo, existe otro tipo de consenso entre los científicos: el general público, que valida socialmente el conocimiento científico y produce lo que llamaremos ciencia institucio-

blecer modelos de discusiones con fuerte consistencia lógica basado la experiencia compartida (utilizando resultados de experimentos, ob vaciones que se hayan hecho en clase, etc.). El diálogo socrático e conversación en la cual el docente guía cuidadosamente al alumno medio de ingeniosas preguntas que promueven las reflexiones y comp siones buscadas. Se entiende entonces que una pregunta es socrática ci do no busca una respuesta previamente aprendida, como las pregu tradicionales de un examen, sino precisamente esas respuestas que sir para desarrollar las ideas. Así es que en estos diálogos, el docente d deliberadamente pedir explicaciones y evidencias de las afirmaciones hacen los estudiantes (por ejemplo, "¿Por qué decís que las personas cesitamos oxígeno para vivir?" o "¿Qué te hace pensar que lo que ha; ese recipiente es agua?"), de manera de poner en evidencia los saltos gicos de los argumentos que se están utilizando. En un aula donde tipo de discusión entre docente y alumno sea omnipresente -a diferet de los interrogatorios en los que el alumno intenta contestar al docent que éste quiere escuchar- paulatinamente los propios estudiantes par parán en discusiones fundamentadas y requerirán unos de otros la ' dencia relevante. En este clima cuestionador y abierto en el que el dise no significa "error" sino un motivo para emprender un refinamiento gn de las ideas, las discusiones grupales son experiencias altamente enrie cedoras.?

Una estrategia para construir esta "cultura indagadora" en la clas: que en las actividades se generen productos concretos que se presten discusión grupal. Los informes de laboratorio, por ejemplo, se pueden i como herramientas en el proceso de construcción social si se los orgai como si fueran trabajos de investigación originales y se pi de a unos ah nos que evalúen los informes de los otros siguiendo las reglas de arbit de las revistas científicas.

Esto equivale a instaurar una especie de arbitraje similar al que al para publicar artículos científicos en revistas profesionales. Este tipo de bajo requiere de una guía clara por parte del docente, quien debe estable

iautas para la crítica de un trabajo científico. Por ejemplo, se les puede pelir a los estudiantes que busquen, por un lado, qué conceptos no han sido -xplicados en el trabajo, qué afirmaciones no tienen evidencia explícita o [ué fallas presenta el diseño experimental y, por otro, que encuentren ideas ntererantes o novedosas en el trabajo y realicen propuestas para mejorarlo. i\sí, los alumnos estarán aprendiendo a ofrecer críticas constructivas.

LA SOCIOLOGÍA DE LA CIENCIA EN ELAULA

Además de adquirir herramientas de discusión y saber escuchar a los demás, y de aprender cómo se construye el conocimiento de manera social dentro del aula, los alumnos deben conocer la dinámica de trabajo de los científicos, dentro de la comunidad de investigadores en su totalidad. Para ello, podría ser una experiencia valiosa para los estudiantes invitar (si se cuenta con la posibilidad) a un científico para que cuente a los alumnos cómo es el "día a día" del trabajo científico y cómo se dan las discusiones en los grupos de investigación. Incluso podría explicar cómo funciona el sistema de arbitraje de las revistas y contar qué pasó con el último artículo que su grupo envió a publicación. ¿Fue aceptado? ¿Sugirieron cambios?

2. Debemos aclarar que el concepto clásico de "pregunta socrática" se refiere a la mulación de preguntas que fomentan respuestas lógicas e inductivas sin necesidad de r zar los experimentos cruciales para la comprensión de un fenómeno natural (de hech. Sócrates ni la mayoría de sus contemporáneos eran muy afectos a las comprobaciones e ri mentales).

Otra estrategia que se puede utilizar con el mismo fin es que los alumnos lean y analicen alguno de los excelentes libros que describen cómo se hace ciencia en grupos de investigación profesionales. En los años setenta, por ejemplo, el sociólogo Bruno Latour trabajó un tiempo con los investigadores del Instituto Salk de investigaciones biológicas (La Jolla, Estados Unidos) y publicó un análisis sociológico de esa experiencia (Latour y Woolgar, 1995). El escritor Jonathan Weiner también pasó casi cinco años con el grupo de Seymour Benzer en el Instituto de Tecnología de California (Caltech) compartiendo la actividad de los investigadores. En su libro *Time, love and memory* nos hace partícipes de su vivencia durante la búsqueda de los orígenes genéticos del comportamiento de *Drosophila melanogaster*; la mosca de la fruta (Weiner, 2000). La antropóloga Sharon Traweek (1988), por su parte, describió y analizó, usando un abordaje etnográfico, las tareas e interacciones sociales en tres laboratorios de física de altas energías en tres ciudades diferentes (dos en Estados Unidos y una en Japón). Asimismo, la dinámica social dentro de laboratorios en Francia y la Argentina ha sido objeto de diversas investigaciones realizadas por el sociólogo argentino Pablo Kreimer (1999).

El tema de la comunicación entre científicos y la forma en que la comunidad científica valida el conocimiento que ella misma genera pueden ser ilustrados en el aula de diferentes maneras. Una estrategia interesante es poner a los alumnos en contacto con revistas científicas reales (que pueden conseguirse gratuitamente en bibliotecas o en algunos casos a través de Internet) y mostrar cómo grupos de investigación de distintos países investigan un mismo tema y se citan los unos a los otros en sus trabajos. Otra forma de hacerlo es seleccionar artículos de diferentes épocas que investiguen un mismo tema y mostrar cómo el conocimiento se va construyendo sobre la base de las investigaciones de otros. Los artículos científicos son, la mayoría de las veces, demasiado específicos como para que los estudiantes los comprendan en profundidad, aunque es posible seleccionar artículos relativamente simples que pueden ser analizados en clase. La idea de poner a los alumnos en contacto con el material con el que se comunican los científicos "de verdad" tiene por objeto darles una idea más acabada del quehacer científico.

La relación entre ciencia y cultura, política, historia y fuerzas económicas es todo un capítulo en sí mismo. Un ejemplo paradigmático de esto es el efecto de la Segunda Guerra Mundial en el desarrollo de la bomba atómica y la física nuclear, y, más tarde, el efecto de esos descubrimientos en los sucesos históricos y en nuestra vida diaria. La biotecnología, la ingeniería genética, la revolución verde, el desarrollo de medicamentos, el efecto invernadero o incluso otros casos menos modernos, como la invención de la bombita eléctrica o el desarrollo mismo de la electricidad, son, entre muchísimos otros, ejemplos de enorme riqueza que se pueden usar en el aula para analizar las complejas relaciones entre ética, historia y ciencia. En un interesante trabajo práctico desarrollado en la Universidad de Harvard (<http://www.hnmun.org>) se combinan naturalmente los aspectos geopolíticos y económicos con los de la ciencia del medioambiente. En esta actividad, los estudiantes se dividen en "delegaciones" por países y deben simular una reunión de las Naciones Unidas sobre calentamiento global y llegar a acuerdos políticos y económicos que reduzcan la emisión de gases de efecto invernadero."

3. Esta actividad se ha realizado en la Argentina, así como en otros países, de acuerdo con el llamado "Modelo de Naciones Unidas", con el auspicio de UNESCO y de la organización cívica Conciencia <www.concienciadigital.com.ar>.

El docente puede sencillamente narrar los casos históricos, Para ello, existen numerosas fuentes detalladas de procesos históricos, incluyendo memorias y biografías de personajes importantes de la historia de la ciencia." Otra buena estrategia para abordar este tema es crear en el aula "juegos" orales en los que las partes aporten evidencias y testimonios que defiendan o critiquen un desarrollo científico en relación con sus efectos sobre la sociedad, En el capítulo 11 damos un ejemplo sobre el tema de la experimentación con animales, Otros temas podrían ser el desarrollo de alimentos transgénicos o de centrales nucleares, o el uso de células embrionarias humanas en la investigación científica.

Por otra parte, pueden realizarse en clase lecturas críticas de artículos periodísticos formulando, por ejemplo, las siguientes preguntas: ¿qué evidencias científicas tiene el autor de lo que dice? ¿Cuáles de las cosas que dice son opiniones? ¿Qué intereses puede haber detrás de las palabras del autor? Este tipo de trabajo enseña a los estudiantes a cuestionar lo que leen sobre la base de su propio conocimiento, y a buscar información de confianza a partir de la cual tomar decisiones.

En cualquier caso, lo que buscamos en el aula es triple. Por un lado, queremos que los estudiantes, en su trabajo grupal, experimenten en carne propia cómo ponerse de acuerdo sobre lo que observan y sobre las inferencias e interpretaciones que hacen sobre esas observaciones. Por otro lado, deseamos que los estudiantes entiendan cómo la comunidad científica en su totalidad llega a estos acuerdos y qué tipo de herramientas usa para garantizar el libre intercambio de ideas y la crítica constructiva. Por último, queremos que aprecien cómo esta mecánica de trabajo hace que la ciencia sea vulnerable a los prejuicios y sesgos personales y culturales.

A continuación reunimos algunas de las prácticas pedagógicas que hemos sugerido en este capítulo para resaltar el aspecto social de la ciencia. En los dos capítulos que siguen ofreceremos ejemplos del uso de esas prácticas. El capítulo 11 presenta un debate sobre la experimentación con animales -un tema que involucra criterios científicos y éticos-o En el capítulo 12 se

4. Michael R. Matthews (1994) analiza en bastante detalle y con abundantes referencias el uso de la historia y la filosofía de las ciencias en la enseñanza de las ciencias. También puede verse el excelente libro de Conant (1957) con casos históricos. La editorial Nivola de España ha lanzado una colección de biografías de científicos (véase, por ejemplo, DíazHellín, 2001) que incluyen a Faraday, Mendel, Linceo, Fleming y Copérnico. Los textos clásicos de Jacob Bronowski (1973) así como las historias de descubrimiento de Daniel Boorstin constituyen otro excelente punto de partida.

presentan diálogos socráticos para elaborar argumentos consistentes sobre lo que significa que algo "está vivo". Estos argumentos sirven, además, para mostrar por qué el significado de la idea "estar vivo" ha sufrido modificaciones a lo largo del tiempo.

*PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS SUGERIDAS PARA DESTACAR EL ASPECTO SOCIAL DE LA
CIENCIA*

- Fomentar la discusión en pequeños grupos (análisis de experimentos, formulación de hipótesis, etc.).
- Promover las presentaciones orales y escritas de los alumnos a sus pares, con amplia discusión y crítica constructiva.
- Utilizar diálogos socráticos para detectar saltos lógicos en las argumentaciones y facilitar la construcción de argumentos consistentes.
- Buscar consensos en la clase sobre la base de la evidencia disponible.
- Considerar casos históricos en los que una idea científica fue modificada o descartada, haciendo hincapié en la naturaleza de la crítica (empírica, ideológica, filosófica u otra).
- Analizar con ejemplos concretos la relación entre ciencia y sociedad (en sus aspectos históricos, políticos, éticos y económicos).

•

11

**EXPERIMENTACIÓN CON
ANIMALES:
SIMULACIÓN DE UN JUICIO**

cultura donde la ciencia se desarrolla. Qué factores determinan los valores de una sociedad, cómo surgen y se construyen, e incluso si existen o no valores absolutos, es el foco de atención de disciplinas como la sociología, la antropología, la filosofía y la religión, y no nos ocuparemos aquí de ello.

El tipo de discusión que abordamos en este capítulo tiene profunda relevancia en la ciencia actual, ya que se debaten cuestiones controversiales como la experimentación con células embrionarias humanas, el desarrollo de alimentos transgénicos o la utilización de la energía nuclear. La estrategia didáctica que proponemos aquí -la simulación de un juicio a un científico- permite generar de manera lúdica un

La ciencia es una empresa humana y, como tal, está sujeta a las influencias sociales, religiosas, políticas y económicas de cada momento histórico. Entender cómo se trabaja en ciencia, por lo tanto, implica también comprender este aspecto fundamental de la génesis del conocimiento.

Por otra parte, para formarse como sujetos críticos y con capacidad de tomar decisiones fundamentadas, es necesario que los estudiantes aprendan a discutir con bases sólidas las implicancias éticas y *sociales* de los avances de la ciencia, comprendiendo sus alcances y su impacto sobre diferentes aspectos de nuestra vida y de la del resto de los habitantes del planeta.

En este capítulo proponemos una actividad que tiene como objetivo abordar este aspecto social de la ciencia, fomentando el desarrollo de un espíritu crítico basado en argumentaciones constructivas. Es importante resaltar que no discutiremos aquí la veracidad o la falsedad de una teoría científica sino las consecuencias éticas de la aplicación de un descubrimiento o de una forma de trabajo dentro de la actividad científica. Hasta aquí hemos propuesto actividades en las que las diferentes posturas se dirimen sobre la base de experimentos que pueden cerrar la discusión en uno u otro sentido. En esta actividad, por el contrario, ejemplificaremos una situación que no se resuelve apelando a la realidad externa, como es el caso de una teoría que debe ajustarse a los aspectos empíricos del problema. Se trata de una situación, un problema, que tiene que ver con los valores vigentes en la

espacio en la escuela para la discusión de problemas científicos con un profundo contenido ético.

La estrategia del juicio promueve que los estudiantes se pongan "en la mente del otro" a la hora de argumentar y contraargumentar, desarrollando su capacidad de detectar huecos lógicos en argumentos propios y ajenos. En este sentido, la simulación de un juicio en la clase ayuda a generar herramientas que también son útiles para los debates y la construcción conjunta, por parte de los alumnos, de ideas científicas o, más en general, de una capacidad crítica racional que les permita enfrentar las más diversas situaciones.

La elección del tema para la simulación de un juicio se puede hacer a partir de una noticia periodística, de un caso tomado de la realidad y modificado para el trabajo en el aula o incluso puede ser una historia inventada. En cualquier caso, la "historia" abordará un tema que, según la estimación del docente, pueda resultar provocativo para los alumnos. En este capítulo utilizaremos como ejemplo un caso ficticio que trata el tema de la experimentación con animales.

ACTIVIDAD: JUICIO A LA EXPERIMENTACIÓN CON ANIMALES

Antes de comenzar, se dividirá a los estudiantes en dos grupos y se les asignará arbitrariamente el papel de la defensa y la fiscalía. Es conveniente asignar estos roles de antemano, de manera que los alumnos tengan suficiente tiempo para ir pensando en los argumentos que utilizarán. El trabajo suele ser incluso más enriquecedor para los alumnos si les toca representar una postura contraria a la suya personal, porque los desafía a encontrar argumentos convincentes desde una perspectiva opuesta a sus creencias.

Luego, el docente leerá a la clase un caso supuestamente real como el que presentamos a continuación: 1

1. Conviene plantear la historia como un caso real, aunque al final de la actividad se les explique a los alumnos que es inventado, ya que esto suele generar una mayor motivación en ellos

- *Experimentación con animales: simulación de un juicio*

El caso del doctor Andrada

Marcos Andrada es el director de un grupo de investigación que lleva 15 años trabajando sobre un tema apasionante: comprender mejor el cáncer, a fin de intentar encontrar una cura para esa enfermedad. En el transcurso de estos últimos años, el grupo del doctor Andrada ha hecho estudios con células en cultivo y con ratones, que lo han llevado a descubrir algunos factores relacionados con la multiplicación descontrolada de las células que forman los tumores. Por ello, además, el doctor Andrada recibió diferentes premios en mérito a sus investigaciones y es un miembro reconocido de la comunidad científica y respetado por su grupo.

En los últimos meses, sus investigaciones han avanzado hasta llegar a un punto culminante: el doctor Andrada piensa que puede estar en las puertas de un descubrimiento que podría revolucionar los tratamientos conocidos para el cáncer, y que incluso podría ser la cura tanto tiempo buscada. Claro que uno nunca está seguro de cuáles pueden ser los resultados de una investigación, aunque Andrada rara vez se equivoca en sus palpitos.

El equipo de investigadores confía plenamente en las ideas de Andrada, que hasta ahora han demostrado ser bastante acertadas. Siempre han respetado a su director por "ir para adelante", y están muy entusiasmados en dar el salto que podría llevarlos a descubrir la cura de la enfermedad tan temida. Por otro lado, los diversos integrantes del grupo han aportado evidencias, hipótesis e interpretaciones a lo largo de las investigaciones que han llevado hasta este punto.

Pero lo que sucede en un grupo de células en cultivo, y en animales pequeños, suele ser bastante diferente de la respuesta que un tratamiento puede tener en los seres humanos, y eso Andrada lo sabe mejor que nadie. Por eso, el paso que sigue es probar sus ideas en monos. Los experimentos consistirán en inyectar tumores a los monos, inyectarles luego diferentes compuestos que podrían detener el tumor, y por último matar a los monos para comprobar si el tumor se detuvo y si hubo metástasis en otras partes del cuerpo, a través de biopsias de los tejidos. Para que los resultados sean confiables, será necesario experimentar durante largos meses con muchos monos, tal vez varias decenas.

•
¿Vivo o no vivo?: dialogando se aprende

Estudiante 1: Pero seguro que hay algunos materiales que sólo están presentes en los organismos vivos. Por ejemplo, el ADN.

Docente: De nuevo: con paciencia y buena técnica ustedes pueden fabricar ADN en un tubo de ensayo. Lo mismo vale para las proteínas, que eran otro baluarte de los que defendían que los organismos vivos tenían materiales diferentes de los no vivos.

Estudiante 1: Bueno, entonces cambiamos de estrategia ...

Docente: Antes de que cambien, aclaremos que la postura que están tomando es la que se conoce como vitalismo: las cosas vivas son intrínsecamente diferentes de las inertes porque su composición química y física es distinta.

Estudiante 2: ¡Vitalistas! ¡Vitalistas!

Docente: ¡Orden en la sala!

Estudiante 1: Si me permiten continuar con mi exposición les puedo contar que este objeto fue hallado en una playa, cerca del mar, y podemos notar inmediatamente que, si trazamos una línea por la mitad, es perfectamente simétrico.

Docente: ¿Perfectamente?

Estudiante 1: Bueno, casi. .. No lo medimos, pero es casi igual.

Docente: ¿Y por qué no lo miden?

(Intervalo para medición.)

Estudiante 1: Como decíamos, es casi igual: mide 2,3 cm hacia la derecha y 2,5 cm hacia la izquierda.

Estudiante 2: Y, además, tiene manchas diferentes en ambos lados.

Estudiante 1: Pero tiene dos ojos perfectamente simétricos ...

Docente: ¿Dos qué? En este planeta no conocemos esa palabra ...

Estudiante 1: Bueno, estos "cosos" de acá adelante que seguramente le sirven para ver, porque se parecen a los nuestros.

Docente: ¿A nuestras antenas ... ? Cuidado, ahora están usando dos criterios diferentes. Por un lado el criterio de simetría, en este caso bilateral, y por otro, un criterio morfológico: "esto tiene esta forma y por lo tanto sirve para tal cosa". Vamos por partes ...

Estudiante 1: Veamos lo de la simetría. No es perfecta, pero se parece bastante. Es cierto que nosotros podemos dibujar algo perfectamente simétrico, pero lo estamos copiando de la naturaleza viva.

Docente: Algo de eso hay. Lo simétrico nos parece más bello, y más perfecto. Sin saberlo, consideramos a una persona más simétrica como más bonita. Aunque no nos demos cuenta de que no es perfectamente simétrica."

Estudiante 2: ¿ Y eso qué tiene que ver con la vida?

Docente: No lo sé. Pero puede decirnos algo sobre cómo se fue desarrollando este organismo. Si yo les dibujara cómo es este organismo completo (porque otras expediciones han traído más material), se vería con estos apéndices largos a ambos lados del cuerpo, que no son muy simétricos, ya que hay algunos más largos que otros.

Estudiante 1: Pero parecen tener las mismas relaciones.

Estudiante 2: O la misma estructura.

Docente: Exactamente. Aunque no podamos decir mucho acerca de su función ni de esto que ustedes llamaron "ojos": no podemos definir algo por la forma, o porque se parezca a otra estructura con una función conocida."

Estudiante 1: Bueno, pero esto es un cangrejo, ¡Y estaba vivo!

2. Este comentario puede acompañarse con un ejercicio que resulta muy ilustrativo.

Pueden sacarse fotografías de alguien sonriendo, y luego digitalizarlas (por medio de un escáner, por ejemplo). Con un programa de ilustración es sencillo partir la foto al medio, y generar una foto completa a partir de cada mitad. De esta manera se logra una cara formada por dos "hemicaras" izquierdas y otra compuesta por dos "hemicaras" derechas. Es sorprendente comprobar que la expresión de ambas "caras" es completamente diferente; una estará mucho más feliz que la otra.

3. Excelente oportunidad para introducir los conceptos de homología y analogía.

- *¿ Vivo o no vivo?: dialogando se aprende*

b) El caso del caracol

Para este ejemplo resulta ideal conseguir un caparazón de caracol marino, aunque cualquier otro podrá resultar útil.

Estudiante 1 (miembro del grupo que recibió el objeto): Gran jurado, claramente este objeto proviene de algo vivo, porque le hicimos un análisis con la "recontrasupermaquinola" de análisis de materia viviente y el resultado fue "sí".

Docente: ¿ Y qué mide esta máquina?

Estudiante 1: Esteeee ... compara el objeto con todos los objetos vivos conocidos y determina si pertenece a alguno de esos grupos.

Docente: Bueno, pero supongo que la máquina tendrá una base de datos correspondiente a los objetos de nuestro planeta solamente; recuerden que esto proviene de un planeta muy lejano.

Estudiante 2: Pero, si no podemos comparar, ¿cómo hacemos?

Docente: Justamente, ése es el problema. Estamos tratando de ver si hay alguna forma de caracterizar a los objetos vivos o que provienen de algo vivo.

Estudiante 2: Si está vivo es muy fácil: se mueve, se reproduce, respira o fotosintetiza.

Estudiante 1: Las plantas no se mueven.

Docente: Y que yo sepa, ninguno de ustedes se ha reproducido hasta el momento, y están bastante vivos. Por otro lado, la respiración es un proceso bastante complejo, que puede utilizar diferentes sustratos, y hay algunas formas que se mantienen quiescentes durante bastante tiempo.

Estudiante 2: Si es tan difícil establecer que un objeto está vivo, es casi imposible determinarlo cuando ya no lo está ...

Docente: Veamos el objeto que les tocó.

Estudiante 1: Vimos además que tiene un hueco acá, que seguramente servía para contener algo. Además, como el caparazón ... , digo, el objeto, es muy duro, seguramente servía como protección de partes más blandas.

Docente (se saca un zapato y lo arroja hacia el grupo): Este objeto también es bastante duro y tiene un hueco que seguramente contuvo algo ... pero no viene de algo vivo."

Estudiante 1: Por cómo huele ... ¡viene de algo en descomposición!

Docente: No es para tanto ... Nuevamente la forma, el criterio morfológico, no nos dice demasiado.

Estudiante 1: También tiene una espiral.

Docente: Ajá. ¿ Y dónde más hay espirales en la naturaleza?

Estudiante 1: En las galaxias, en los tornados ...

Estudiante 2: ¡ En el inodoro!

Docente: ¿Por qué tendrá una espiral este objeto?

Estudiante 1: Mmmmmhhhh, por ahí es para atraer a otros objetos similares; tal vez lo consideren más lindo.

Docente: Puede ser, pero yo no diría que lo tiene "para" eso; en todo caso le viene bien. ¿Qué más puede ser?

Estudiante 1: Tal vez tuvo que crecer y fue haciéndolo así, en forma de espiral.

Docente: No está nada mal. Parece ser una buena estrategia para ganar terreno. Cuando hay que ganar espacio en una estructura dura, en general hay que usar este tipo de estrategias. Algo similar

4. Lo que sí es cierto es que el zapato fue construido por seres vivos y en este sentido guarda cierta similitud con el caparazón de caracol. El biólogo Jacques Manad (1993) argumenta en su libro *El azar y la necesidad* que una estructura altamente compleja que sugiere una función sí es evidencia de procedencia viva.

los conceptos que se quiere enseñar. Se requiere otra forma de encarar la labor en el aula, diseñada específicamente para resolver los problemas planteados por las preconcepciones, que conduzca al cambio conceptual.

Una de las razones fundamentales por las que la enseñanza declarativa da resultados pobres es que en ningún momento brinda la oportunidad a los estudiantes de tomar conciencia de sus propias concepciones de la realidad y enfrentarlas con resultados que las desafíen. Sin oportunidades de esta naturaleza, los estudiantes seguirán trabajando bajo las premisas de su sentido común ordinario. Es decir, sabernos que el alumno no es una *tabula rasa* en la que el docente escribe las ideas que quiere enseñar, pero además necesitamos entender que el docente tampoco puede borrar lo que ya viene escrito previamente, ni escribir encima."

Una buena técnica para lograr que los alumnos tomen conciencia de sus propias concepciones consiste en pedirles que predigan los resultados de un experimento o una observación (como el caso de las boleadoras citado más arriba) ¹⁹ o que expongan sus interpretaciones de los fenómenos observados. Como hemos dicho, estas predicciones y explicaciones son fruto de la experiencia personal e intuición de los alumnos y es necesario reconocer su existencia -aunque difieran de las explicaciones científicas aceptadas en la actualidad- para luego desafiarlas. Justamente, las explicaciones de los alumnos dan al docente la pauta de por dónde debe empezar a enseñar las ideas consensuadas por la comunidad científica. La tarea del docente consiste en ayudar al alumno a pasar del planteo ingenuo al más sofisticado.

Una vez identificadas claramente las preconcepciones que dificultan el aprendizaje (vale aclarar que no todas las ideas en una clase de ciencias encuentran obstáculos de este tipo), el docente se enfrenta al problema pedagógico de cómo facilitar la transición a la concepción científica que se

18. Este punto está estupendamente ilustrado en el corto cinematográfico *A Private Universe* (Schneps, 1987) en el que se muestran entrevistas a estudiantes secundarios y a graduados de la Universidad de Harvard, quienes, a pesar de su ilustre formación, sostienen "teorías" insostenibles.

19. Una modificación útil de este experimento consiste en armar un cilindro con una "ventana" recortada en su base. Nosotros hemos usado un botellón plástico de agua de 20 litros cuya base fue recortada. El cilindro se apoya en una superficie plana horizontal y en su interior se hace impulsar una bolita de rulemán. La bolita se desplaza por la pared interna del cilindro hasta que llega a la "ventana". Allí el docente detiene la bolita y le pide a cada uno de los estudiantes que dibuje en el piso o en la superficie donde descansa el cilindro cuál es la trayectoria que predice que tomará la bolita. Esta técnica fomenta la discusión y el debate, y además sus resultados son contundentes.

quiere enseñar. El cambio de una concepción a otra estará catalizado, en primer lugar, por la experiencia personal del estudiante. Aquí es donde empiezan a jugar un papel importante los fenómenos discrepantes, aquellos que susciten una contradicción evidente con las ideas previas de los alumnos y requieran su reestructuración. El docente deberá elegir con cuidado, por lo tanto, experiencias de laboratorio, demostraciones, juegos o exploraciones en los que los estudiantes se encuentren con estos fenómenos. Una vez que esto suceda, el docente deberá provocar discusiones conducentes a explicitar el desconcierto generado por la violación de las expectativas de los alumnos de manera de facilitar el reacomodo de las concepciones. Muchas de las ideas discutidas en el capítulo 1 acerca del aspecto empírico de la ciencia brindan estas oportunidades. Por otra parte, el diálogo, la discusión y la verbalización por parte de los estudiantes juegan roles fundamentales en el cambio de concepciones. Las ideas discutidas en el capítulo 10 acerca del aspecto social de la ciencia también pueden ser aplicadas a estos fines.

Por último, gran parte de los esfuerzos de la investigación en didáctica se concentra en determinar secuencias adecuadas para el desarrollo de conceptos particulares, algo que bien podríamos llamar la "microdidáctica" de cada tema. Las secuencias, los experimentos y los enfoques diseñados son puestos a prueba por docentes y reformulados a la luz de los resultados de su aplicación en el aula, en un proceso continuo de refinamiento llevado a cabo en conjunto entre los docentes y los investigadores. En la enseñanza de la física, el texto de Arnold B. Arons (1997b) es francamente iluminador en este sentido. En él se aprecia cómo la microdidáctica tiene un impacto profundo en el aprendizaje de los jóvenes.

En el apartado a continuación recapitulamos las prácticas pedagógicas sugeridas en este capítulo. En los dos capítulos que siguen daremos ejemplos de actividades que las ilustran. En el capítulo 14 propondremos la utilización de fenómenos de formación de imágenes y sombras para indagar, por medio de las predicciones de los alumnos, cuáles son sus ideas sobre la propagación de la luz. En estas experiencias los enfrentamos con fenómenos discrepantes y les pedimos que los expliquen, de manera que sus preconcepciones queden explicitadas y confrontadas y que las ideas científicas que les resultan contraintuitivas queden claras. En el capítulo 15 el hincapié estará puesto en el proceso de enseñanza de los conceptos de fuerza e inercia que -como sabe la mayor parte de los docentes de física- son contraintuitivos y notoriamente difíciles de enseñar.

PRÁCTICAS PEDAGÓGICAS SUGERIDAS PARA DESTACAR EL ASPECTO CONTRA INTUITIVO DE LA CIENCIA

- Reconocer explícitamente el carácter contraintuitivo de algunas ideas científicas e ilustrarlo con casos históricos.
Dar oportunidad a los alumnos para que expliciten y tomen conciencia de las ideas que traen a clase sobre el tema a encarar.
- Buscar fenómenos, situaciones o experimentos discrepantes que pongan de manifiesto la contradicción entre las preconcepciones de los estudiantes y los resultados científicos consensuados.
- Usar la técnica de pedir predicciones y explicación de las predicciones, y luego contrastar la predicción con lo que sucede. Si fuera necesario, lograr que el alumno cambie su explicación incorporando la nueva evidencia.

SOMBRAS E IMÁGENES: EXPLICITACIÓN Y CONFRONTACIÓN DE PRECONCEPCIONES

Hay temas, como la óptica geométrica, que a primera vista parecen ser conceptualmente simples y, por lo tanto, sencillos de enseñar. Sin embargo, veinte años de investigación sobre las ideas de los alumnos muestran que aun la óptica geométrica tiene sus bemoles ya que, con frecuencia, los estudiantes llegan al aula con ideas poco claras o erróneas sobre la naturaleza de la luz y el mecanismo por el cual vemos imágenes y sombras.'

Tomemos, por ejemplo, el concepto de que para ver un objeto es necesario que haya una fuente de luz cuyos rayos, reflejados por el objeto, lleguen a nuestros ojos. Es común que los alumnos den explicaciones que sólo involucran a los ojos y al objeto, a las que un docente poco precavido puede interpretar como explicaciones parcialmente correctas. Pero al profundizar, frecuentemente se encuentra la idea de que los objetos poseen una imagen íntegra que se empequeñece hasta caber en el ojo receptor. También es habitual la idea de un ojo activo que "apresa" la imagen del objeto, a través de un mecanismo como el de los rayos emitidos por el ojo de Superman (cuando utiliza su visión de rayos X) para ver el objeto. Combinando ambas ideas, algunos alumnos conciben un proceso dual en que la imagen sale del objeto y es apresada por el ojo. En estas ideas, la luz no aparece en forma explícita;

1. Véase, por ejemplo, Andersson y Karrqvist (1983), Goldberg y McDermott (1987), y Guesne (1985).

indagando más, se colige que presuponen que la luz es una especie de medio homogéneo pasivo dentro del cual operan los mecanismos ojo-objeto.

Si esto parece estrambótico, comparemos las ideas de los no iniciados en la materia con las ideas desarrolladas a lo largo de la historia acerca de estos temas. Las primeras explicaciones provienen de la época de los griegos y se dividen en dos escuelas: la de los "intrornisionistas" (a la que pertenecen Epicuro y Lucrecio), que suponen que una *eidola* (imagen) del objeto llega a nuestros ojos, y la de los "emisionistas" (como Pitágoras, Euclides y Platón), que postulan que algo (un efluvio) sale del ojo y apresa el color y la forma del objeto. Otros (como Aristóteles y Empédocles) adherían a la idea de los dos flujos, uno que va del ojo al objeto y otro que va del objeto al ojo.

Más adelante, en la Edad Media, los árabes desarrollaron la idea, basada en sus conocimientos de la anatomía del ojo, de que algo más tangible que una mera imagen o un sutil efluvio debía entrar en el ojo. Así aparece la concepción, que todavía circulaba en el siglo XVI, de una luz activa, la cual, al dar contra un objeto, estimulaba la emisión de una imagen que luego viajaba hacia el ojo en los rayos de luz como si fuera sobre rieles. Este rol de la luz como disparadora o gatillo nos ocupará también a nosotros más adelante.

Recién con Kepler, en su libro *Dioptrice*, aparece la explicación que usamos hoy en día, considerando las propiedades de reflexión y refracción de la luz para explicar cómo se forma una imagen del objeto, punto por punto, en la retina del ojo receptor. Esta explicación en términos únicamente de la luz y sus propiedades fue revolucionaria en su momento y terminó con la idea de una imagen que se desprende del objeto y llega al ojo del observador. Por fin se entendía en forma clara el rol de la luz, el objeto y el receptor. Usando el lenguaje de las ciencias cognitivas, el modelo esbozado por Kepler en 1610 es lo que llamaríamos el modelo "experto", a diferencia de los modelos ingenuos de los novicios en el tema.

Las ideas de los niños sobre cómo se forman las sombras han sido objeto de estudio para Piaget (1934). Sucede que en muchos adultos aparecen residuos de estas ideas infantiles. Por ejemplo, en algunos adultos subsiste la idea de que la sombra es un ente que pertenece al objeto y se traslada con él, o que la sombra "huye del Sol" y por eso se encuentra siempre del otro lado del objeto con respecto al Sol (o a la fuente de luz). Según nuestra experiencia, si bien los adultos entienden que la sombra aparece en los lugares a los que el sol no llega, notamos que con frecuen-

cia no pueden -o no saben- hacer la construcción geométrica que permite predecir el largo de su propia sombra en función de la altura del Sol en el cielo. En nuestras clases de astronomía con estudiantes de primer año del ciclo básico universitario comprobamos frecuentemente que los alumnos tienen dificultades con la formación de sombra (*umbra*) y penumbra durante un eclipse. Se puede constatar que esta dificultad tiene su origen en la idea incorrecta de que de cada punto de la fuente luminosa sale un rayo de luz y sólo uno.

LAS IDEAS CONTRAINTUITIVAS SOBRE LA LUZ

Como comentamos en el capítulo anterior, ciertos conceptos que a los docentes nos pueden parecer evidentes y simples, para muchos alumnos son contraintuitivos. En el caso de la formación de imágenes, por ejemplo, es común que a los estudiantes les resulte contraintuitivo que de cada punto de la fuente luminosa emanen rayos en todas las direcciones. En efecto, algunos alumnos postulan que emana un solo rayo, en una dirección preferencial -lo que sería una especie de propagación con un fin determinado, como si el rayo supiera dónde está la apertura por la que tiene que pasar para llegar a la pantalla ... -. En el caso de las sombras, frecuentemente les resulta contraintuitivo que una sombra sea la contraparte de una imagen (es decir, una anti-imagen) y no un ente ligado estrictamente a un objeto.

En tanto los estudiantes reemplazan los conceptos que les son contraintuitivos con otros más cercanos a su propia intuición, el docente se encuentra frente a barreras que dificultan el aprendizaje en formas insidiosas. Para superar este problema, como hemos insistido con anterioridad (véase el capítulo 13), es conveniente e importante un manejo tripartito de la situación, empezando por ayudar a los alumnos a reformular sus concepciones, siguiendo con la demostración de fenómenos discrepantes para evidenciar que esas preconcepciones son inadecuadas (por cuanto no llevan a predicciones correctas de los fenómenos) y, a partir de allí, haciendo hincapié en las explicaciones científicamente válidas que sí predicen las observaciones correctamente.

En este capítulo proponemos una serie de actividades que sirven tanto para hacer explícitas las ideas de los alumnos como para confrontarlas cuando no son adecuadas. Mediante predicciones sobre los resultados de una demostración, los alumnos definen su postura y su forma de pensar sobre el

tema y, cuando el docente demuestra los efectos para comprobar las predicciones, los fenómenos discrepantes aparecen en forma vívida.

HACIENDO EXPLÍCITAS LAS NOCIONES DE LOS ALUMNOS MEDIANTE PREDICCIONES

¿Cómo nos enteramos de qué piensan los alumnos? ¿Cómo logramos que hagan explícitas sus ideas sobre la formación de sombras e imágenes? Sabernos que, si los alumnos parten de ideas incorrectas y el docente no procede en forma activa para volverlas explícitas y confrontarlas, es seguro que tropezarán con verdaderos problemas al estudiar otros temas, como por ejemplo la acción de las lentes (véase Goldberg y McDermott, 1987). Para poner de manifiesto las ideas de los estudiantes sobre la propagación de la luz, hemos desarrollado una serie de actividades en las que les solicitamos que predigan resultados y expliquen sus predicciones. Los resultados de estas actividades dan un buen diagnóstico de cómo concibe cada alumno la propagación de la luz (Feher, 1990). Este diagnóstico permite al docente identificar las nociones que, por ser contraintuitivas para los alumnos, deben ser enseñadas en forma cuidadosa. Para el alumno, advertir que sus ideas no coinciden con la realidad tiene un doble beneficio: es un primer paso para modificar esas ideas y elaborar nuevos y más adecuados modelos, y además sirve para que comprenda mejor cuán arduo es el derrotero de la ciencia misma, que debe lidiar constantemente con resultados sorprendentes.

ACTIVIDADES CON IMÁGENES Y SOMBRAS

Las actividades que describimos a continuación son muy simples de organizar, y las explicaciones de los fenómenos observados no requieren nociones previas sobre reflexión ni refracción, sino que únicamente invocan la propagación rectilínea de la luz.

Los problemas que sugerimos plantear a los alumnos consisten en predecir y explicar lo que se verá en una pantalla cuando se la ilumina con una fuente de luz y se intercalan aperturas (ventanas) y objetos (obstáculos) entre la luz y la pantalla. El quid de la cuestión es que la fuente de luz tenga forma definida y que la luz no sea difusa. La fuente de luz puede ser el filamento de una lamparita incandescente no esmerilada. En nuestras cla-

•

Fuerzas

Estudiante: Porque si no, no se movería.

Docente: Lo que estás diciendo es que un objeto no se puede mover sin una fuerza que lo mueva. A ver, volvamos a la situación del hielo seco. ¿Se acuerdan? Imaginen un pedazo de hielo seco sobre la mesa, sin moverse. ¿Cuál es la fuerza neta" que actúa sobre el hielo seco?

Estudiante: Es cero; el hielo seco no se mueve. Su peso es compensado por la mesa que lo empuja para arriba."

Docente: Perfecto. Ahora imaginemos que lo empujo un poquitín. Mientras lo empujo, la fuerza neta no es cero, ¿verdad? Y ahora lo dejo de empujar. ¿Qué pasa con el hielo seco?

Estudiante: Se sigue moviendo.

Docente: ¿Se acelera?

Estudiante: Si no lo empujás, no.

Docente: ¿Va yendo cada vez más despacio?

Estudiante: No ... en realidad, no. Se para cuando choca con algo, y a veces va más despacio cuando la mesada está sucia.

Docente: Sí, pero cuando está limpia ...

Estudiante: Va a velocidad constante.

Docente: ¿Y cuál es la fuerza neta que actúa sobre el hielo seco en ese momento?

Estudiante: ¿... La fricción?

Docente: Dijimos que casi no hay fricción.

5. Asumimos aquí que los estudiantes han avanzado en su estudio de dinámica y saben qué es la combinación vectorial de fuerzas y la fuerza neta.

6. También asumimos que han estudiado la fuerza normal.

Estudiante: Es verdad, no hay fricción ... así que ... la fuerza neta tiene que ser cero.

Docente: Es cero. Supongamos que lo empujo despacito en la misma dirección en la que se mueve; entonces va a acelerar. Y si lo empujo en la dirección opuesta a su movimiento se va a desacelerar. ¿Sea que si lo empujo, si aplico una fuerza, por más pequeña que sea, el hielo seco se va a acelerar o se va a ir desacelerando. ¿No es cierto?

Estudiante: Sí.

Docente: Pero si yo estoy tirando del objeto y el objeto todavía se mueve con velocidad constante quiere decir que tiene que haber una fuerza exactamente igual pero contraria que haga que la fuerza neta sea cero. ¿Y cuál es esa fuerza?

Estudiante: Tiene que ser la fricción.

Docente: Entonces, ¿qué valor tiene que tener la fricción?

Estudiante: Tiene que ser de 500 N Y en la dirección contraria. Yo entiendo. Lo que no puedo creer es que un objeto pueda moverse con fuerza neta cero.

Docente: ¡Aleluya! ¡Claro que es difícil de creer! La mayor parte de la humanidad no lo creyó por miles y miles de años. Los pensadores más geniales no se dieron cuenta. Tuvo que venir un Galileo para poder verlo. No es nada fácil. Y de eso hablábamos el otro día: de cómo la ciencia nos muestra cosas que parecen totalmente locas y contraintuitivas. No hay que sentirse mal porque cueste entenderlo, las mentes más grandes tienen las mismas dificultades.

En este diálogo vemos cómo podemos usar la experiencia del bloque de hielo seco para volver a ella y evocar en los estudiantes las sensaciones que buscamos, y que puedan a través de esta evocación encontrar la respuesta correcta al problema que enfrentan. Ésta es una estrategia posible con ideas contraintuitivas: encontrar una experiencia o fenómenos que hagan cortocircuito con las ideas previas o que ilustren o den apoyo a las ideas que queremos desarrollar; después, este fenómeno puede ser un punto de referencia común para poder pensar otras situaciones.

Las ideas contraintuitivas no dejarán de serlo por más que las abordemos directamente y sin ambigüedades; volverán a salir a la superficie una y otra vez como cuestiones no resueltas. El docente tiene que estar preparado para explicar estos temas una y otra vez y para ayudar a sus alumnos a visualizar la situación numerosas veces. Si se puede, es aconsejable diseñar el currículo de tal manera que las ideas contraintuitivas aparezcan en nuevas representaciones, es decir, con otros aspectos, en otros contextos. Al estudiar electrostática, por ejemplo, puede aparecer la idea de fuerza eléctrica y ésta es una buena excusa para analizar nuevamente problemas que involucren las leyes de Newton y la idea de fuerza. Las concepciones erróneas, basadas en el sentido común, volverán a asolar la clase y no se darán por vencidas. Tampoco debe rendirse el docente.

- Brindar la oportunidad a los estudiantes de observar fenómenos y de formar sus propias ideas sobre ellos.
- Usar la secuencia "fenómeno-idea-terminología" al explorar un tema.
- Utilizar preferentemente definiciones operacionales en lugar de definiciones de corte teórico.
- Modificar o refinar conceptos y definiciones de términos sobre la base de nuevas observaciones o ideas.
- Desarrollar ideas a partir de experiencias o prácticas de laboratorio.
- Usar actividades de exploración guiadas que arranquen "de cero", es decir, fomentando que los estudiantes construyan sus ideas de acuerdo a lo que perciben.

Prestar atención a la dinámica del aula; por ejemplo, brindando suficiente tiempo a los alumnos para que piensen y elaboren sus respuestas a preguntas del docente.

- Poner especial atención en indagar la evidencia empírica que lleva a formular conceptos cuando se trata de fenómenos no observables en el aula.

Considerar casos históricos, analizando la secuencia de desarrollo de una idea a partir de las observaciones y los experimentos, incluyendo la definición de términos.

- Analizar casos históricos de desarrollo de preguntas, hipótesis, experimentos y análisis de resultados.
- Desarrollar en los estudiantes el arte de formular preguntas deliberadamente.

•
Desarrollar en los estudiantes el hábito de preguntar "cómo" antes de "por qué".
•

Desarrollar el hábito de preguntarse "¿Qué pasaría si ... ?" (es decir, qué pasaría si cambio variables en el fenómeno observado). A falta de predicciones basadas en explicaciones causales se pueden admitir "conjeturas educadas" pero no admitir adivinanzas descabelladas.

- Desarrollar en los estudiantes el hábito de formular hipótesis frente a cualquier pregunta.
- Desarrollar en los estudiantes la costumbre de hacer predicciones basadas en la hipótesis formulada.
- Fomentar en los estudiantes la capacidad de observación y descripción de lo que observan.
- Enseñar a distinguir entre observación e inferencia o interpretación.
- Estimular el diseño de experimentos que puedan contestar las preguntas o contrastar las hipótesis propuestas.
- Involucrar a los alumnos en experimentos en los que tengan que realizar mediciones para interpretar la validez o no de una hipótesis propuesta.
- Estimular en los alumnos la exploración de diversos tipos de metodologías alternativas o complementarias para la resolución de los experimentos.
- Cuando sea posible, resolver problemas en forma cualitativa antes de embarcarse en cálculos matemáticos.
- Ejercitar la formulación de modelos en clase.
- Clarificar la necesidad de introducir ideas inventadas.
- Enfatizar la conexión entre el aspecto creativo y la base empírica de la ciencia.

-
- Realizar predicciones basadas en los modelos desarrollados y ponerlas a prueba experimentalmente.
 - Recaltar mediante *ejemplos* la forma en que una teoría da sentido a amplios conjuntos de observaciones.
-
- Fomentar la discusión en pequeños grupos (análisis de experimentos, formulación de hipótesis, etc.).
-
- Promover las presentaciones orales y escritas de los alumnos a sus pares, con amplia discusión y crítica *constructiva*.
-
- Utilizar diálogos socráticos para detectar saltos lógicos en las argumentaciones y facilitar la construcción de argumentos consistentes.
 - Buscar consensos en la clase sobre la base de la evidencia disponible.
 - Considerar casos históricos en los que una idea científica fue modificada o descartada, haciendo hincapié en la naturaleza de la crítica (empírica, ideológica, filosófica, u otra).
 - Analizar con ejemplos concretos la relación entre ciencia y sociedad (en sus aspectos históricos, políticos, éticos y económicos).
 - Reconocer explícitamente el carácter contraintuitivo de algunas ideas científicas e ilustrarlo con casos históricos.
 - Dar oportunidad a los alumnos para que expliciten y tomen conciencia de las ideas que traen a clase sobre el tema a encarar.
 - Buscar fenómenos, situaciones o experimentos discrepantes que pongan de manifiesto la contradicción entre las preconcepciones de los estudiantes y los resultados científicos consensuados.
 - Usar la técnica de pedir predicciones y explicación de las predicciones, y luego contrastar la predicción con lo que sucede. Si fuera necesario, lograr que el alumno cambie su explicación incorporando la nueva evidencia.

•

BIBLIOGRAFÍA

- Andersson, B. Y Karrqvist, C. (1983): "How Swedish pupils, aged 12-15 years, understand light and its properties", *European Journal of Science Education*, vol. 5, págs. 387-402.
- Arons, Arnold B. (1997a): *The Various Language: An Inquiry Approach to the Physical Sciences*, Nueva York, Oxford University Press.
- (1997b): *Teaching Introductory Physics*, Nueva York, John Wiley and Sonso
- Asimov, Isaac (1975): *Breve historia de la química*, Madrid, Alianza. - (1980): *Breve historia de la biología*, Buenos Aires, Eudeba.
- Bateson, Gregory (1990): *Espíritu y naturaleza*, Buenos Aires, Amorrortu. Bonaparte, Pablo R. (2001): *La mirada del marciano. Ensayos para conocer lo conocido*, Buenos Aires, EUDEBA.
- Boorstin, Daniel J. (1986): *Los descubridores*, Barcelona, Crítica. Bronowski, Jacob (1973): *El ascenso del hombre*, Bogotá, Fondo Educativo Interamericano.
- Brumby, Margaret (1979): "Problems learning the concept of natural selection", *Journal of Biological Education*, vol. 13, n° 2, págs. 119-122.
- Bryson, Bill (2004): *Una breve historia de casi todo*, Barcelona, RBA Editores.
- Burke, James (1995): *Connections*, Boston, Little Brown & Co.

- Burnharn, R.; Dyer, A.; Garfinkel, R.A.; George, M.; Kanipe, J.; Levy, D.H. (1998): *Observar el cielo JJ*, Barcelona, Planeta.
- Cassidy, David; Holton, Gerald y Rutherford, James (2002): *Understanding Physics*, Nueva York, Springer- Verlag.
- Cereijido, Marcelino (1997): *Por qué no tenemos ciencia*, México, Siglo XXI.
- Conant, James B. (1947): *On Understanding Science*, New Haven, Yale University Press.
- (1951): *Science and Common Sense*, New Haven, Yale University Press.
 - (1957): *Harvard Case Histories in Experimental Science*, Cambridge, Harvard University Press.
- Cromer, Alan (1993): *Uncommon Sense: The Heretical Nature of Science*, Nueva York, Oxford University Press.
- Darwin, Charles (1995): *Autobiografía*, Madrid, Alianza.
- (2001): *Charles Darwin 's Beagle Diary*, Cambridge, Cambridge University Press.
- De Boer, George (1991): *A History of Ideas in Science Education*, Nueva York, Teachers College Press.
- Dewey, John (1938): *Experience and Education*, Nueva York, Macmillan. Díaz-Hellín, José Antonio (2001): *El gran cambio en la física: Faraday*, Madrid, Nivola.
- Einstein, Albert e Infeld, Leopold (1938): *The Evolution of Physics*, Nueva York, Touchstone.
- Estalella, José (1918): *Ciencia recreativa*, Barcelona, Gustavo Gili.
- Feher, E. (1999): "Interactive Museums as Tools for Learning: Explorations with Light", *International Journal of Science Education*, vol. 12, n° 1, págs.34-49.
- Furio Mas, Carlos I.; Pérez Hernández, Juan y Harris, Harold H. (1987):
 "Parallels between adolescents conception of gases and the history of chemistry", *Journal of Chemical Education*, vol. 64, n° 7, págs. 616-618.
- Furman, M. y Zysman, A. (2001): *Ciencias naturales: Aprender a investigar en la escuela*, Buenos Aires, Novedades Educativas.
- Galilei, Galileo (1632): *Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo: ptolemaico y copernicano*, Madrid, Alianza, 1995.
- (1638): *Diálogos acerca de dos nuevas ciencias*, Madrid, Losada, 2004. Gardner, Howard (1996): *La nueva ciencia de la mente. Historia de la revolución cognitiva*, Barcelona, Paidós.

- (J 997): *La mente no escolarizada. Cómo piensan los niños y cómo deberían enseñar las escuelas*, Barcelona, Paidós.
- Gingerich, Owen (2005): *The Book Nobody Read*, Londres, Penguin Books.
- Goldberg, F. y McDermott, L.e. (1987): "An investigation of student understanding of the real image formed by a converging lens or concave mirror", *American Journal of Physics*, vol. 55, págs. 108-119.
- Gould, Stephen J. (1997): *El pulgar del panda*, Barcelona, Crítica. - (2001): *La grandeza de la vida*, Barcelona, Crítica.
- (2003): *Lafalsa medida del hombre*, Barcelona, Crítica.
- Guesne, E. (1985): "Light", en R. Driver, E. Guesne y A. Tgiberghioen (comps.), *Children's Ideas in Science*, Filadelfia, Open University Press.
- Halperin Donghi, Leticia (1967): *Lavoisier*; Buenos Aires, Centro Editor de América Latina.
- Harcombe, Elnora (2001): *Science Teaching / Science Learning, Constructivist Learning in Urban Classrooms*, Nueva York, Teachers College Press.
- Harré, Rom (1981): *Great Scientific Experiments. Twenty Experiments that Changed our View of the World*, Mineola, Dover Publications.
- Hempel, Carl G. (1973): *Filosofía de la ciencia natural*, Madrid, Alianza Editorial.
- Holton, G. y Roller, D. (1958): *Foundations of Modern Physical Science*, Addison- Wesley Publishing Co.
- Jacob, Francois (2002): *La estatua interior*, Barcelona, Tusquets.
- James, Frank A. J. L. (comp.) (1991): *The Correspondence of Michael Faraday*, Londres, Institution of Electrical Engineers.
- Jammer, Max (1957): *Concepts of Force. A Study in the Foundations of Dynamics*, Nueva York, Dover Publications.
- Judson, Horace F. (1996): *The Eight Day of Creation. Makers of the Revolution in Biology*, Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Karplus, Robert (1963): *One Physicist Looks at Science Education*, Berkeley, Science Curriculum Improvement Study.
- (1969): *Introductory Physics: A Model Approach*, Nueva York, W.A. Benjamin.
- Karplus, R. y Thier, H.D. (1967): *A New Look at Elementary School Science*, Chicago, Rand McNally.
- Keller, Evelyn Fox (2000): *Lenguaje y vida. Metáforas de la biología en el siglo XX*, Madrid, Manantial.

- Koshland, D. E. (2002): "The seven pillars of life", *Science*, vol. 295, págs. 2216-2216.
- Kreimer, Pablo (1999): *De probetas, computadoras y ratones*, Buenos Aires, Universidad Nacional de Quilmes.
- Kuhn, Thomas S. (1962): *La estructura de las revoluciones científicas*, México, Fondo de Cultura Económica, 1995.
- Latour, Bruno y Woolgar, Steve (1995): *Vida en el laboratorio: la construcción de los hechos científicos*, Madrid, Alianza.
- Levy, D. (1995): *Observar el cielo*, Barcelona, Planeta.
- Lewontin, Richard C. (1991): *Biology as Ideology: The Doctrine of DNA*, Nueva York, Harper Perennial.
- Matthews, Michael R. (1994): *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*, Nueva York, Routledge.
- Maturana, Humberto y Varela, Francisco (1984): *El árbol del conocimiento. Las bases biológicas del entendimiento humano*, Santiago de Chile, Editorial Universitaria.
- McCloskey, M. (1983): "Intuitive Physics", *Scientific American*, vol. 248, págs. 122-130.
- McDermott, Lillian (1984): "Research on conceptual understanding in mechanics", *Physics Today*, vol. 37, n07, págs. 2-10.
- McDermott, Lillian C.; Shaffer, Peter S.; Rosenquist, Mark L. y el Physics Education Group University of Washington (1996): *Physics by Inquiry: an Introduction to Physics and the Physical Sciences*, Nueva York, John Wiley.
- Menzel, D. H. y Pasachoff, J. M. (1990): *Guía de campo de las estrellas y los planetas*, Madrid, Omega.
- Monod, Jacques (1993): *El azar y la necesidad*, Barcelona, Tusquets.
- Moore, John A. (1999) *Science as a Way of Knowing: The Foundations of Modern Biology*, Cambridge, Harvard University Press.
- Piaget, Jean (1934): *La causalidad física en el niño*, Madrid, Espasa-Calpe.
- (1991): *La construcción de lo real en el niño*, Barcelona, Grijalbo.
- Piaget, Jean y García, Rolando (1982): *Psicogénesis e historia de la ciencia*, México, Siglo XXI.
- Poirier, Jean-Pierre (1993): *Lavoisier: Chemist, Biologist, Economist*, Filadelfia, University of Pennsylvania Press.